SÉRIE
DE LA GESTION
DE L'ÉNERGIE

15

À L'INTENTION
DES INDUSTRIES,
COMMERCES
ET INSTITUTIONS

Mesures et Contrôle

Énergie, Mines et Ressources Canada
Energy, Mines and Resources Canada
Canada

PRÉFACE

L'art et la science de la gestion de l'énergie ont accompli des progrès remarquables au cours de la dernière décennie. La gestion de l'énergie est devenue une discipline sérieuse dans le cadre du processus de gestion de la plupart des entreprises qui connaissent le succès.

D'abord, au début des années 70, on a mis sur pied des programmes d'économie d'énergie afin de réduire la menace de pénurie d'énergie que pesait sur le Canada, de même que la dépendance du pays à l'endroit du pétrole étranger. Toutefois, la hausse vertigineuse des prix n'a pas tardé a donner une signification nouvelle à l'expression «économie d'énergie»: réduire le coût de l'énergie.

Nombre d'industries, de commerces et d'organismes publics ont relevé le défi et abaissé les coûts d'énergie jusque dans une proportion de 50%. On est ainsi arrivé à utiliser l'énergie de façon rationnelle, grâce à des mesures telles que des programmes d'information à l'intention du personnel, des moyens d'entretien plus à point, la simple élimination du gaspillage, et en mettant de l'avant des projets aptes à moderniser ou améliorer les installations et l'équipement.

Pour en arriver maintenant à économiser d'avantage l'énergie, il importe de mieux connaître la technologie et ses applications en plus d'avoir recours à des appareils à haut rendement énergétique.

A la demande du Programme d'é[illegible]ie d'énergie dans l'industrie canadienne, du Programme des groupes de travail sur la gestion de l'énergie dans les secteurs commercial et institutionnel, et d'associations professionnelles et commerciales intéressées, la Division de l'énergie industrielle du ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources a élaboré une série de modules techniques portant sur la gestion de l'énergie.

Ces manuels aideront les gestionnaires et le personnel d'exploitation à découvrir les possibilités de gestion de l'énergie dans leur cadre de travail. On y trouve une quantité de renseignements pratiques, notamment des équations mathématiques, des renseignements généraux sur des techniques éprouvées, ainsi que des exemples concrets d'économie d'énergie.

Pour obtenir de plus amples renseignements concernant les modules figurant dans la liste qui suit ou la documentation utilisée dans le cadre des ateliers, y compris les études de cas, veuillez écrire à l'adresse suivante:

Division de l'énergie industrielle
Direction des économies d'énergie
Ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources
580, rue Booth
Ottawa, Ontario
K1A OE4

Gestion de l'énergie et participation des employés
Évaluation de la consommation
Analyse financière énergétique
Compatibilité de la gestion énergétique
Récupération de la chaleur perdue
Isolation thermique des équipements
Éclairage
Électricité
Moteurs électriques économiseurs d'énergie
Combustion
Appareillage de chaufferie
Accumulation thermique
Systèmes à vapeur et à condensat
Chauffage et refroidissement énergétique (Vapeur et eau)
Conditionnement de l'air
Refroidissement et pompes à chaleur
Systèmes de distribution d'eau et d'air comprimé
Ventilateurs et pompes
Compresseurs et turbines
Mesures et contrôles
Régulation automatique
Manutention des matériaux et transport sur place
Point de vue architectural
Fours, sécheurs et fours de cuisson

Ministre des Approvisionnements
et Services Canada 1985
N° de cat. M91-6/15F
ISBN 0-662-93337-0

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
NOTIONS DE BASE	3
Objectif	3
Terminologie des mesures	3
Avantages des activités de mesure et de contrôle	4
Normes	5
Précision	5
Terminologie	5
Sources d'erreur des instruments	6
Précision d'un instrument de mesure	6
Répétabilité	7
Plage d'insensibilité	7
Étalonnage	8
Précision d'une chaîne de mesure	8
Contrôle	8
Analyse énergétique	9
Analyse au passage	9
Analyse de diagnostic	9
Sommaire	9
APPAREILLAGE	11
Mesure des variables de processus	11
Catégories d'appareils de mesure	12
Capteurs à indication directe	12
Transmetteurs et transducteurs	12
Transmission du signal de sortie	13
Mesure du débit	15
Débitmètres différentiels	15
Débitmètres à sondes de pression	18
Débitmètre à turbine	19
Compteur volumétrique	19
Débitmètre à section variable	19
Débitmètre à vortex	20
Débitmètres sans contact	20
Pompes	21

Mesure de la température 22
Thermomètres de type mécanique 22
Thermomètres de type électrique 22

Mesure de la pression 24
Manomètres à colonne de liquide 24
Manomètres à tubes de Bourdon, à soufflet et à membrane 25
Jauges de contraintes 25

Mesure du niveau 27
Tube de niveau 27
Niveaumètres à action mécanique 27
Niveaumètres à pression 28
Niveaumètres à action électrique 28

Mesure du poids 29

Mesure des grandeurs électriques 29
Terminologie 29
Types de compteurs d'électricité 30

Analyse des gaz de cheminée 32
Analyseurs d'oxygène 32
Analyseurs de gaz carbonique et de monoxyde de carbone 33
Systèmes d'échantillonnage des gaz de cheminée 33
Étalonnage 33

Contrôle 33
Interrupteur 34
Annonciateur 34
Indicateur 34
Enregistreur 34
Totalisateur 35
Collecteur de données 35
Ordinateur 35

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE 37

Possibilités de maintenance 37
Étalonnage 37
Registres 38

Exemples concrets de maintenance 38
Étalonnage 38
Registres 38

Possibilités d'amélioration de coût modique 38
Choix de la précision des instruments 38
Conception favorable au rendement énergétique 39
Montage des instruments 39
Filtres 39
Contrôle de l'analyse des gaz de cheminée 39
Contrôle des systèmes de conditionnement de l'air 39
Détecteurs d'anomalies 39

Exemples concrets d'améliorations de coût modique 39
Choix de la précision des instruments 39
Conception favorable au rendement énergétique 40
Montage des instruments 40
Filtres 41
Contrôle de l'analyse des gaz de cheminée 41
Contrôle des systèmes de conditionnement de l'air 41
Détecteurs d'anomalies 41

Possibilités de rénovation 41
Mesure 41
Demande électrique de pointe 42
Optimisation de l'exploitation des chaudières 42
Correction des défauts de conception 42

Exemples concrets de rénovations 42
Mesure 42
Demande électrique de pointe 43
Optimisation de l'exploitation des chaudières 43
Correction des défauts de conception 43

ANNEXES

A Glossaire
B Conversions courrantes
C Liste de contrôle

INTRODUCTION

Les appareils de mesure et de contrôle jouent un rôle indispensable, de nos jours, que ce soit à la maison ou au travail. L'exemple le plus simple est certes la mesure de la température déclenchant la marche du système de chauffage, du réfrigérateur ou de la cuisinière, ou encore la mesure du temps donnée par les montres et les horloges. Une pléiade d'instruments d'une haute technicité ont fait leur apparition en raison du besoin fondamental de mesures dans la plupart des activités humaines et de l'élan qui pousse à la découverte, à l'invention et au développement.

Autrefois, l'estimation des mesures procédait par simple analogie: on jugeait la distance par le nombre de lunes que durait un parcours, ou le volume par le contenu d'une poignée ou d'un panier. Par la suite, on éprouva la nécessité d'employer des unités de mesure plus précises pour diverses activités telles que la division des terres en lots et le calcul des poids et des volumes pour le commerce. On en vint progressivement à reconnaître l'utilité de définir des normes précises pour bien délimiter les unités de mesure employées. Il fallut ensuite que des instruments soient mis au point pour mesurer ces unités normalisées. C'est ainsi que l'on peut dire que les normes de mesure et les instruments de mesure se sont développés de pair.

Or, l'énergie est un élément omniprésent dans la vie de tous les jours, et elle coûte très cher. Le présent module vise à instruire sur les appareils de mesure et de contrôle qui permettent d'obtenir un meilleur rendement de l'énergie consommée et de réduire les dépenses correspondantes. Si la définition d'un programme de gestion de l'énergie est un moyen rationnel et méthodique de réduire les consommations d'énergie et les dépenses encourues, c'est bien par l'emploi d'appareils de mesure et de contrôle qu'on peut obtenir les données nécessaires pour implanter de façon concrète un tel programme.

Les cinq étapes décrites ci-après sont essentielles dans tout *Programme de gestion de l'énergie* et font voir l'importance du rôle des appareils de mesure et de contrôle.

- Il faut déterminer où l'énergie est consommée et en quelles quantités, ce qui exige de mesurer l'énergie fournie ou consommée.
- Il faut évaluer l'exploitation présente, et déterminer les endroits où elle devrait être modifiée.
- Il faut déterminer les objectifs à atteindre en matière de rendement énergétique.
- Il faut améliorer l'exploitation et comparer, sur une base continue, les résultats ainsi obtenus avec ceux du mode d'exploitation antérieur. Diverses mesures sont donc nécessaires pour évaluer l'amélioration des rendements. Les améliorations pourraient également inclure la mise en place de dispositifs de régulation automatique, et ces dispositifs dépendent de mesures exactes.
- Il faut formaliser les méthodes de mesurage pour bien cerner les modes d'utilisation de l'énergie et faire des comparaisons significatives avec les modes antérieurs. De telles comparaisons constituent la base de tout système de comptabilisation de l'énergie, et cette base même repose sur les données recueillies par les appareils de mesure, autrement dit, les résultats de mesure.

Les appareils de mesure comprennent les compteurs qui servent à mesurer les consommations de vapeur, d'eau, d'huile, de gaz naturel et d'électricité.

Les résultats de mesure permettent d'évaluer le rendement obtenu des diverses formes d'énergie mises en oeuvre dans l'exploitation des équipements et des processus. *Les fonctions de collecte, d'interprétation et d'analyse des résultats de mesure constituent le contrôle.* Il y a des instruments disponibles pour cette fonction de contrôle qui enregistrent les données dans le temps et, parfois même, traitent l'information recueillie pour la mettre sous une forme plus facilement utilisable: ces instruments constituent ce qu'on appelle l'appareillage de contrôle.

Le sujet du présent module *Mesures et contrôle* est couvert de façon assez détaillée pour permettre de faire une évaluation préliminaire du rôle que peut jouer ce type d'appareillage dans la *gestion de l'énergie*. Une fois la possibilité d'économiser l'énergie identifiée, l'on peut évaluer les exigences qui s'y rattachent, choisir l'instrument approprié, calculer la période de rentabilisation, et implanter les activités de mesure efficaces. Dans certains cas, il peut être nécessaire de se procurer l'assistance de spécialistes pour faire l'analyse définitive du cas et fixer les détails de l'implantation.

Il est essentiel de bien comprendre la matière contenue dans le présent Module 15 pour aborder le sujet de la régulation automatique dont traite le Module 16. Ces deux modules, ainsi que le Module 1 - Isolation thermique des équipements techniques, possèdent un dénominateur commun en ce qui concerne les économies d'énergie. Ce dénominateur commun est que les appareils de mesure et de contrôle ou les dispositifs isolants ne permettent de réaliser des économies d'énergie que par l'exploitation améliorée des équipements et des processus qui en résulte.

Le présent module a été divisé en trois chapitres qui expliquent les principes, les objectifs et les diverses applications des appareils de mesure et de contrôle.

- Le chapitre *Notions de base* présente les grandes lignes du sujet, définit ce qu'on entend par la précision, et décrit les mesures efficaces pour une bonne gestion de l'énergie.
- Le chapitre *Appareillage* décrit les divers types d'instruments de mesure et de contrôle, et comprend des tableaux comparatifs de leurs caractéristiques et de leurs coûts relatifs.
- Le chapitre *Possibilités de gestion de l'énergie* développe divers exemples concrets illustrant le rôle que peuvent jouer les appareils de mesure et de contrôle pour réduire la consommation d'énergie et les dépenses correspondantes.
- Les annexes contiennent un glossaire du sujet, des tableaux comparatifs d'instruments, des tables de conversion d'unités de mesure ainsi qu'une liste de contrôle permettant d'évaluer les possibilités de gestion de l'énergie.

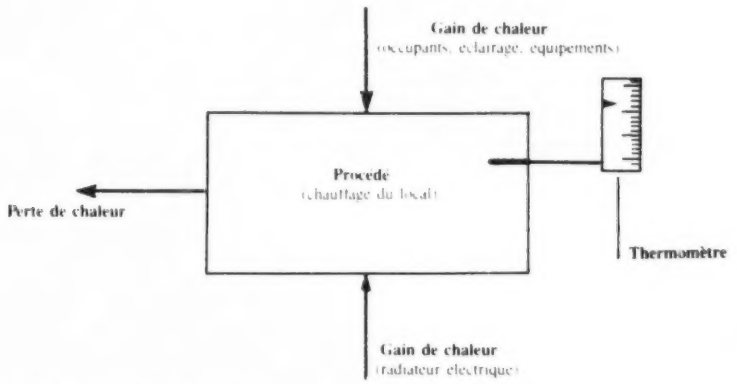
NOTIONS DE BASE

Les activités de mesure interpénètrent une foule d'activités journalières, depuis la mesure du temps, de la température à l'intérieur des immeubles et des variables intervenant dans le fonctionnement des équipements de fabrication et de traitement, jusqu'aux mesures hautement scientifiques employées dans les technologies médicales et spatiales. Les mesures jouent un rôle très important dans la gestion des applications de l'énergie, afin de réduire les coûts d'exploitation de toute installation industrielle, de tout bâtiment commercial et de tout immeuble de caractère public.

Objectif

L'utilisation des instruments de mesure et de contrôle a pour objectif de fournir des indications fiables sur l'exploitation des bâtiments, des équipements et des processus. En général, ces indications permettent:

- de connaître les diverses variables de processus telles que la température, le débit, la pression et le niveau;
- de déterminer le rendement global d'une installation pour le comparer à son rendement antérieur ou au rendement d'une autre installation analogue;
- de calculer le rendement énergétique d'une exploitation et faire des comparaisons avec des exploitations analogues. Cette activité forme la base de la comptabilisation de l'énergie.



Exemple de procédé
Figure 1

Terminologie des mesures

Il est nécessaire de connaître la terminologie de base du domaine des mesures pour bien choisir et bien utiliser les instruments. Divers termes sont expliqués à l'intérieur du présent module, et de nombreux autres sont définis dans le glossaire présenté en annexe. La liste suivante explique quelques-uns des termes principaux.

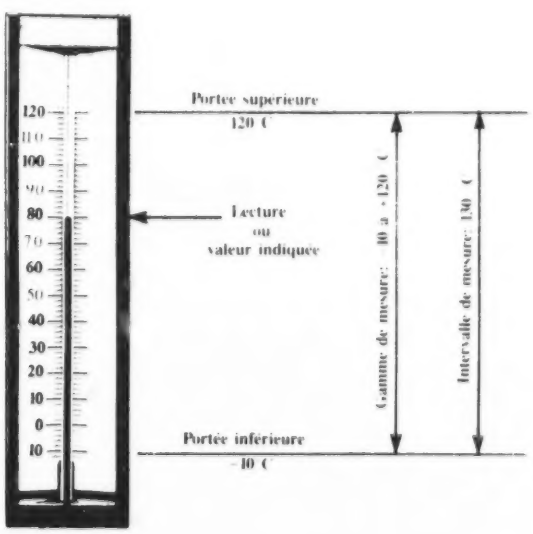
- Un *processus* désigne un système d'exploitation ou une activité industrielle où il se produit un changement dans la matière ou une conversion de l'énergie. Le sens donné ainsi au mot processus est nettement plus large que le sens généralement perçu d'une opération de conversion à l'intérieur d'une usine chimique. Un exemple de processus pourrait être le chauffage d'un local par un radiateur électrique (figure 1). La perte thermique de la pièce est composée des pertes thermiques individuelles. Le gain de chaleur provient de sources telles que les occupants, les appareils d'éclairage et l'équipement (ce sont des sources non contrôlées), en plus du radiateur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie thermique. Un thermomètre indique la température de la pièce. Le radiateur pourrait être mis en marche ou à l'arrêt manuellement, ou commandé automatiquement au moyen d'un thermostat, qui est un appareil de mesure et de régulation de la température.

- Une *variable de processus* est une grandeur ou un état qui influence un processus. Dans l'exemple précédent, on pourrait distinguer comme variables de processus la déperdition thermique totale du local, le gain thermique non contrôlé et l'apport de chaleur provenant du radiateur.
- Une *variable mesurée* est une grandeur, une propriété ou un état qui est mesuré. Dans l'exemple précédent, la variable mesurée est la température du local.
- Un *élément sensible* est un dispositif qui capte la valeur de la variable mesurée. Toujours dans le même exemple, le thermomètre est l'élément sensible qui capte les variations de température.
- Il est important de comprendre une autre caractéristique de mesure qu'on appelle le *temps de réponse*. Il s'agit du délai qui existe entre le moment où la variable mesurée commence à changer et celui où l'instrument capte ce changement. Le temps de réponse est particulièrement appréciable dans le mesurage de la température, puisque la chaleur prend souvent un certain temps avant de pénétrer dans les parois de l'élément sensible. Par conséquent, lorsqu'on doit faire des observations ou des réglages, le processus doit s'être stabilisé pour que l'on soit certain que la température mesurée est exacte.

Avantages des activités de mesure et de contrôle

Les activités de mesure des variables de processus et le contrôle ultérieur des résultats de mesure présentent de nombreux avantages, notamment les suivants:

- Elles *facilitent les prises de décision* en vue d'améliorer l'exploitation.
- Elles *assurent l'uniformité de l'exploitation*, même avec un personnel qui n'a pas beaucoup d'expérience.
- Elles permettent de calculer le rendement des équipements d'exploitation, donc *révèlent les mauvaises utilisations de l'énergie*.
- Elles *forment la base d'une bonne commande manuelle* des équipements et des processus.
- *La régulation automatique* ne serait pas possible sans la présence d'éléments de mesure révélant la grandeur des variables de processus telles que la température, le débit, la pression et le niveau. Cela est d'autant plus vrai dans le cas des processus plus complexes, que l'on serait incapable d'optimiser pour économiser l'énergie sans disposer de mesures fiables.
- *Les programmes de gestion de l'énergie* dépendent de la fiabilité des mesures, pour permettre d'évaluer l'exploitation présente, de la comparer avec ce que l'on considère comme réalisable, et de définir des plans d'action , ptes à améliorer l'emploi de l'énergie. *La comptabilisation de l'énergie*, qui fait partie intégrante de tout programme de gestion de l'énergie, exige aussi que l'on dispose de mesures fiables, prélevées de façon uniforme dans des périodes consécutives d'analyse.



Thermomètre
Figure 2

Si on prend un immeuble à logements multiples, on peut dire que le propriétaire vend, en fait, de la chaleur à ses locataires. Il est intéressant de noter que la même chose se produit dans une installation industrielle où la vapeur est «vendue» à plusieurs services. Dans chaque cas, les propriétaires désirent tirer le maximum de chaque unité de combustible consommée. C'est donc par la mesure de l'énergie employée et de la vapeur produite qu'ils peuvent quantifier le rendement effectivement obtenu pour s'assurer la meilleure rentabilité possible. La mesure des températures intérieure et extérieure aide à évaluer la consommation d'énergie par rapport aux besoins réels. La mesure de la température à l'intérieur d'une installation permet en outre de mieux contrôler les emplois qu'on y fait de l'énergie.

La mesure des températures intérieure et extérieure procure des données qui servent à calculer la déperdition thermique totale d'un bâtiment. Ce calcul peut justifier des améliorations telles que l'installation d'un isolant thermique supplémentaire. Le chapitre sur les possibilités de gestion de l'énergie donne des exemples qui montrent bien comment les activités de mesure peuvent amener à réduire les dépenses reliées à la consommation d'énergie.

Normes

Depuis longtemps est apparue la nécessité de reconnaître des conventions définissant des unités de mesure des poids et des volumes pour faciliter le commerce, et des mesures de longueur pour délimiter les terrains. D'autres types de mesures se sont avérés nécessaires avec le temps, et c'est ainsi que de nos jours, des normes universelles règlent toutes les grandeurs physiques. On peut trouver une information détaillée sur les normes de mesure dans les traités de physique. Nous citons ci-après quelques-unes des grandeurs physiques que l'on mesure couramment, de nos jours, grâce aux normes définissant leurs unités de mesure.

Accélération
Capacitance
Chaleur rayonnante
Chaleur spécifique
Composition chimique
Composition spectroscopique
Compression
Conductivité
Consistance
Couleur
Couple
Courant
Débit
Degré hygrométrique
Densité (densité relative)
Densité absolue (masse volumique)
Déplacement
Dilatation
Dimensions
Ductilité
Dureté
Enthalpie
Entropie
Épaisseur
Explosivité
Force
Forme
Fréquence
Humidité
Impédance
Inductance
Lumière visible
Masse
Masse volumique (densité absolue)
Moment
Niveau
Oxydation
pH
Poids
Poids moléculaire
Position
Pourcentage d'imbrûlés
Pouvoir calorifique
Pression
Propriétés cristallines
Quantités électriques
Radiations nucléaires
Rayons infrarouges
Rayons ultraviolets
Réduction
Réflectance
Réflexion
Résistance
Son audible
Température
Temps
Tension
Tension électrique
Turbidité
Ultrasons
Vide
Viscosité
Vitesse
Volume

Précision

Terminologie

L'emploi de mesures adéquates permet de définir clairement les règles d'exploitation d'une installation. Par exemple, si on détermine à l'avance qu'une opération doit s'arrêter lorsque la température atteint 85 °C, l'entraînement et le niveau d'expérience du personnel d'exploitation peuvent être réduits sans affecter l'efficacité de l'installation. En outre, le mode d'exploitation peut être raffiné progressivement grâce à la mesure et à l'observation des variables de processus. On peut établir des rendements cibles qui soient réalistes, et faire des comparaisons entre les divers rendements progressivement obtenus. Il est donc très important de savoir comment s'exprime la précision offerte par les instruments de mesure, afin de pouvoir choisir ceux qui répondent le mieux aux exigences des processus. Le thermomètre de la figure 2 aidera à bien comprendre les termes de mesure définis ci-après.

- Lorsque le thermomètre sert à mesurer la température d'un local, cette température constitue la *variable mesurée*.
- Tout instrument de mesure a une limite inférieure de mesure; cette valeur la plus basse qu'il peut mesurer s'appelle la *portée minimale*. Dans la figure 2, la portée minimale du thermomètre est de -10°C.
- Tout instrument de mesure a une limite supérieure de mesure; cette valeur la plus élevée qu'il peut mesurer s'appelle la *portée maximale*. Dans la figure 2, la portée maximale du thermomètre est de 120°C. C'est à cette portée maximale que se rapporte la notion de «calibre» d'un instrument de mesure.
- La zone comprise entre la portée minimale et la portée maximale de mesure constitue ce qu'on appelle la *gamme de mesure* de l'instrument, qui est exprimée par les deux portées limites de mesure. Dans notre exemple, le thermomètre a une gamme de mesure de -10°C à +120°C. La même zone comprise entre les deux portées limites de mesure peut également être désignée par le nombre total d'unités de mesure qui y sont contenues et on parle alors de l'*intervalle de mesure*. Le thermomètre cité en exemple a un intervalle de mesure de 130°C.
- L'échelle du thermomètre permet de lire les températures intermédiaires entre la portée minimale et la portée maximale de sa gamme de mesure. La présence de cette échelle graduée permet d'assimiler le thermomètre à un *indicateur de température*. La grandeur de la température mesurée (80°C) est ce qu'on appelle la *valeur indiquée* ou, plus couramment, la *lecture*.
- La *valeur réelle* ou *valeur vraie* d'une variable mesurée est la valeur existant en réalité d'après la norme conventionnelle de mesure. Dans notre exemple, la valeur vraie serait la température réelle exprimée en degrés Celsius comptés d'après la norme définie pour cette unité de mesure.

Sources d'erreur des instruments

L'*erreur de mesurage* est la différence entre la valeur vraie de la variable mesurée et la valeur indiquée. *L'amplitude de l'erreur de mesurage dépend des limitations de l'appareil employé pour étalonner le capteur et la gamme de mesure, et de la sensibilité du capteur lui-même*. Les limitations des appareils d'étalonnage échappent au contrôle de l'usager. L'usager doit, par contre, choisir les appareils d'étalonnage suivant le degré de précision dont il a besoin et définir leur mode d'utilisation.

La bonne compréhension des sources d'erreur dues au capteur lui-même, et de la façon dont le degré de précision des instruments est exprimée par leurs fabricants, aide à choisir adéquatement les instruments. Les points suivants sont les sources les plus importantes d'erreur:

- Les pièces mobiles d'un capteur peuvent être gênées par des problèmes tels que le frottement.
- Les conditions ambiantes (par exemple, température, pression et humidité) dans lesquelles se trouve le capteur peuvent affecter les résultats de mesure.
- Il arrive que l'observateur soit incapable de lire avec précision la valeur indiquée.
- La nature de la variable mesurée peut avoir une grande influence sur les résultats de mesure, particulièrement sur le résultat d'une mesure unique. Par exemple, prenons le cas où la température d'un processus fluctue de façon cyclique entre deux températures extrêmes. L'on sait qu'il y a un délai qui s'écoule entre le moment où le capteur est soumis à une nouvelle température et le moment où le valeur mesurée est indiquée. Or, si la température varie constamment de façon périodique, la température réelle ne pourra jamais être obtenue. Des lectures multiples sont donc nécessaires pour obtenir une valeur représentative.
- Le vieillissement des composants d'un instrument peut être une source d'erreur, mais l'étalonnage périodique minimise cet effet.

Les fabricants d'instruments de mesure indiquent le degré de précision des instruments sous certaines conditions spécifiques d'exploitation. Ces conditions de référence varient selon le fabricant et le type d'instrument, mais la garantie de précision est toujours indiquée en fonction de conditions ambiantes ayant une influence directe sur la variable mesurée.

Précision d'un instrument de mesure

Dans l'exemple du thermomètre (figure 1), la *précision* est une expression de la différence entre la température indiquée et la température réelle en présence des conditions de référence spécifiées. En réalité, il est bien question de l'imprécision de l'instrument, mais par convention, on dit qu'on en exprime ainsi la précision. *La précision d'un capteur est exprimée par rapport à la variable mesurée*, soit en unités de mesure, soit en pourcentage. Cette précision est définie par les fabricants selon diverses méthodes:

- En *pourcentage de l'intervalle de mesure*. Si la garantie de précision du thermomètre est fixée à $\pm 2\%$ de l'intervalle de mesure, l'erreur maximale de la valeur indiquée serait alors de 130°C x 0,02 = 2,6°C ce qui signifie qu'il pourrait y avoir un écart de $\pm 2{,}6$°C entre la température réelle et la température indiquée.

- En *pourcentage de la portée maximale*. Avec une précision de ±2% de la portée maximale, l'erreur maximale de la valeur indiquée serait de 120°C x 0,02 = 2,4°C ce qui signifie qu'il pourrait y avoir un écart de ±2,4°C par rapport à la température réelle. Lorsque la précision de l'instrument est spécifiée en pourcentage de l'intervalle de mesure ou de la portée maximale, on obtient une meilleure précision en réduisant l'intervalle de mesure. Il est donc préférable d'employer une gamme de mesure le plus faible possible, qui correspond le mieux aux valeurs extrêmes que la variable mesurée peut atteindre pendant l'exploitation du processus.
- En *pourcentage de la valeur indiquée*. Une précision de ±2% de la valeur indiquée entraîne une erreur maximale de 80°C x 0,02 = 1,6°C. Ainsi, une température indiquée de 80°C pourrait, en fait, s'écarter de ±1,6°C de la température réelle.

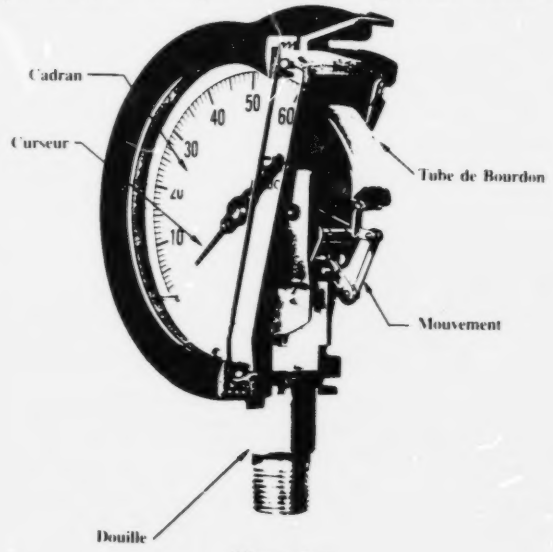
Les exemples précédents démontrent qu'un degré de précision de 2% pourrait entraîner des erreurs de température de 2,6°C ou de 2,4°C ou encore de 1,6°C. Il est donc nécessaire de déterminer l'importance que présente pour un processus quelconque, la précision supplémentaire offerte par certains instruments, et de calculer l'économie qu'on peut en tirer sur les coûts d'exploitation. On peut alors comparer les coûts et évaluer la rentabilité d'instruments plus coûteux mais d'une plus grande précision.

Répétabilité

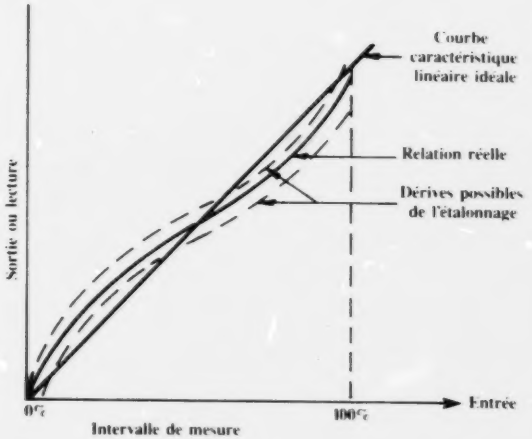
La répétabilité désigne la capacité d'un instrument de mesure de présenter fidèlement la même indication en présence de variables de la même grandeur. Grâce à l'expérience acquise dans l'exploitation d'un processus, le personnel peut déterminer qu'une condition voulue est atteinte lorsque le thermomètre indique 90°C, même si la température indiquée s'écarte de plusieurs degrés de la température réelle. Un thermomètre d'une grande répétabilité peut ainsi assurer une excellente qualité d'exploitation, puisque les mêmes valeurs indiquées représentent toujours les mêmes grandeurs de la variable mesurée.

Plage d'insensibilité

Le concept de la plage d'insensibilité est bien illustré par le fonctionnement d'un manomètre (figure 3). Une augmentation de pression a pour effet de redresser le tube de Bourdon, faisant ainsi tourner les engrenages dans un sens donné. Aussi longtemps que la pression augmente, les engrenages tournent avec leurs dentures en prise serrée. Lorsque la pression commence à baisser, la rotation des engrenages est inversée. Du fait qu'il y a toujours certaines imperfections dans l'usinage des engrenages, il existe un certain jeu dans les dentures et ce jeu doit être rattrapé avant que le curseur de sortie commence à se déplacer. La *plage d'insensibilité* est la variation de l'entrée qui, au moment de l'inversion de la variable mesurée, ne provoque pas de changement dans l'indication du curseur. On peut réduire l'influence de ce délai en évitant de lire l'instrument aussitôt après une inversion de l'entrée. Par expérience, on finit par connaître la période d'attente avant de prendre une lecture.



Manomètre
Figure 3



Courbe d'étalonnage
Figure 4

Étalonnage

L'étalonnage est l'action de régler un instrument de sorte que la gamme de mesure et la précision de l'indication de sortie conviennent à l'application prévue, compte tenu de la sensibilité de l'instrument. Sur la plupart des instruments, on peut régler le zéro et la gamme de mesure. Le réglage du zéro produit un déplacement parallèle de la courbe d'étalonnage, et le réglage de la gamme de mesure modifie sa pente.

Un thermomètre à tube de verre ne possède pas de réglage de la gamme de mesure, mais s'il est monté sur une échelle séparée, il possède un réglage du zéro. S'il arrive que l'échelle (figure 2) soit déplacée, il faut réétalonner le thermomètre en le plongeant dans de l'eau glacée et en replaçant l'échelle de sorte que son repère 0°C corresponde à la hauteur du liquide indicateur dans le tube. Ce «réglage du zéro» est un étalonnage de point unique, qui est le plus simple. Lorsqu'un thermomètre comporte un réglage de la gamme de mesure, on l'étalonne en deux temps: on commence par plonger l'élément sensible dans de l'eau bouillante pour régler la limite supérieure de sa gamme de mesure, et ensuite, on le plonge dans l'eau glacée pour régler le zéro. Il est préférable de répéter cette double opération pour s'assurer que les valeurs correspondent bien aux limites de la gamme de mesure.

L'étalonnage d'un instrument permet de réduire l'erreur de mesurage de l'instrument, représentée par la dérive (autrement dit, la déviation dans le temps) de la courbe d'étalonnage par rapport à la courbe linéaire idéale de référence (figure 4). La courbe de température réelle est fonction du mécanisme de l'instrument, et on ne peut que difficilement en modifier la forme. Cependant, la position et la pente de la courbe, par comparaison à la courbe idéale de référence, peuvent être déplacées globalement par le réétalonnage de l'instrument. Cela peut être avantageux du fait que la zone de la plus faible erreur est le point où la courbe réelle croise la courbe idéale. Si on peut déplacer le point d'intersection pour l'amener à la position où la plupart des lectures sont prises, l'erreur globale de sortie est réduite.

Précision d'une chaîne de mesure

Souvent, la mesure d'une variable exige l'emploi de plusieurs instruments. Par exemple, une chaîne de mesure de débit à distance comprend un transmetteur de débit qui mesure la pression différentielle de part et d'autre d'une plaque à orifice installée dans la conduite, et un indicateur monté dans la salle de commande à une certaine distance du transmetteur. Or, chacun de ces instruments comporte des limites de précision. Cela signifie que la précision globale de la chaîne de mesure est fonction de la précision des trois instruments qui la composent. On ne peut pas calculer avec exactitude la précision d'une chaîne de mesure, mais on peut la déterminer en vérifiant le bon étalonnage de ses composants. Autrement, on ne peut que présumer que la précision de la chaîne de mesure se trouve quelque part entre la somme des précisions de chacun des trois instruments et la précision de l'instrument le moins précis.

Contrôle

On vient d'étudier les avantages, les normes et les caractéristiques de précision concernant les mesures et les instruments de mesure. Cette information, complétée par le chapitre sur l'appareillage, aidera à choisir l'instrument de mesure approprié.

Le contrôle implique toujours une certaine collecte de données, mais cette activité peut varier considérablement. Voici des exemples de contrôle:

- Noter mentalement la température indiquée par un thermomètre.
- Consigner manuellement une température dans un registre.
- Constituer un registre permanent d'une certaine variable par l'inscription de ses diverses grandeurs mesurées sur un diagramme d'enregistrement.
- Obtenir un rapport journalier d'une variable mesurée en raccordant le capteur à un ordinateur qui prélève sa valeur périodiquement pour l'imprimer plus tard.

Les avantages de la collecte des données ne se présentent de façon concrète qu'au moment où les données sont interprétées et exploitées. Des exemples typiques d'exploitation des résultats de mesure sont décrits ci-après.

- On arrête un radiateur de chauffage après avoir constaté la température régnant dans le local.
- On consigne les paramètres de marche d'une chaudière afin de pouvoir calculer les rendements obtenus à différents régimes de chauffe. On peut alors comparer sa performance avec d'autres performances déjà obtenues, et adopter les mesures correctives nécessaires si la comparaison est désavantageuse. Un graphique représentant les rendements par rapport aux profils de charge peut également servir à déterminer la combinaison la plus avantageuse de chaudières en fonction de la charge de vapeur réellement exigée de la chaufferie.
- Les données recueillies peuvent être analysées dans le cadre d'un programme d'analyse énergétique.

- Les données pourraient également fournir les renseignements nécessaires à la mise en place d'un système de comptabilisation de l'énergie. Ce genre de système exploite d'après des règles précises les données relatives à l'énergie, pour définir des rendements énergétiques cibles et surveiller les résultats. La consommation d'énergie peut être comparée avec celle des périodes antérieures d'analyse pour évaluer la performance réelle de la chaufferie et l'efficacité des mesures d'économie de l'énergie mises en application. Ce sujet est étudié en détail dans le Manuel de comptabilisation de l'énergie, qui fait partie de la présente série.

Analyse énergétique

Analyse au passage

L'*analyse au passage* consiste en une inspection visuelle de l'installation pour voir comment l'énergie y est employée ou gaspillée. Dans la plupart des installations industrielles, bâtiments commerciaux et immeubles de caractère public, l'analyse au passage permet d'identifier les *possibilités de gestion de l'énergie*. Cette reconnaissance est généralement plus significative si elle est faite «d'un oeil neuf», c'est-à-dire par une personne qui n'est pas responsable de l'exploitation de cette installation mais qui connaît bien les questions de gestion de l'énergie. Cela fait ressortir des anomalies aussi évidentes qu'un réservoir qui déborde ou de l'eau qui s'écoule à l'égout. Ces anomalies peuvent être constatées par un opérateur, mais elles auraient parfois avantage à être suivies par des instruments relativement simples et peu coûteux. L'analyse au passage fait également ressortir des lacunes que le personnel d'exploitation peut difficilement contrôler, alors que des appareils de mesure simples en seraient capables. Dans cette catégorie, on peut citer les dispositifs enfermés tels que les filtres à air et tous les appareils inaccessibles, auxquels on pourrait associer des manomètres, des thermomètres ou des débitmètres qui signaleraient rapidement toute anomalie provoquant un gaspillage d'énergie.

Analyse de diagnostic

Dans la plupart des cas, on ne peut conclure à la nécessité d'ajouter ou d'améliorer un *appareillage de mesure et de contrôle* qu'après une analyse détaillée du coût instruments et des économies d'énergie pouvant en résulter. Cette analyse détaillée est ce qu'on appelle l'*analyse de diagnostic*. Elle consiste en un examen préliminaire permettant d'identifier les solutions possibles, suivi d'une étude plus approfondie des options les plus intéressantes. Par conséquent, cette analyse détaillée permet de prendre une décision éclairée, en confirmant la validité d'une solution concrète ou en démontrant que la modification n'est pas rentable.

Une *liste de contrôle* a été mise au point pour guider l'analyste, en suscitant la réflexion sur l'opportunité d'employer des instruments de mesure et de contrôle, et en identifiant l'application des principes développés dans le présent module.

Cette liste de contrôle suggère les étapes d'analyse suivantes:

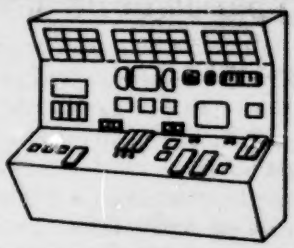
- Faire l'inventaire de l'*appareillage de mesure et de contrôle* existant.
- Vérifier si l'appareillage existant est adéquat.
- Faire l'inventaire des cas où il serait avantageux d'ajouter d'autres instruments ou d'améliorer ceux qui sont en place.
- Evaluer les économies ou les améliorations de rendement possibles.
- Évaluer le coût des acquisitions ou des améliorations d'appareillage.
- Déterminer si les coûts semblent justifiés et rejeter les solutions non rentables.
- Déterminer les étapes à suivre et les personnes à contacter pour obtenir une évaluation détaillée.

Sommaire

Le présent chapitre a développé les points suivants:

- La grandeur mesurée d'une variable est représentative seulement par comparaison à une norme. L'utilité d'un mesurage augmente parfois avec son degré de précision.
- La précision d'un instrument étant souvent meilleure lorsque sa gamme de mesure est relativement réduite, il est avantageux de garder la gamme de mesure au minimum en tenant compte des variations de la variable mesurée.
- La répétabilité d'un instrument de mesure est souvent plus importante qu'une précision absolue.
- La précision d'une chaîne de mesure est fonction de celle de ses composants, et cette précision ne peut être déterminée avec fiabilité que par la vérification de l'étalonnage des composants.
- Toute mesure doit être associée à une activité de contrôle pour qu'elle soit utile.
- La présence d'instruments de mesure est indispensable au contrôle.

APPAREILLAGE



Le présent chapitre décrit l'appareillage de mesure et de contrôle en détaillant plus particulièrement les instruments utilisés pour la gestion de l'énergie. Les instruments de mesure sont groupés d'après la caractéristique qu'ils mesurent (débit, température, etc.) ou d'après leur mode de fonctionnement (types d'appareils). Dans les grandes catégories d'appareils, on trouve, par exemple, les capteurs à indication directe, les transmetteurs et les transducteurs.

Les instruments de mesure sont décrits sous les diverses rubriques de débit, température, pression, niveau, poids, grandeurs électriques, et analyse des gaz de cheminée. Les principes de base, les modes de fonctionnement et les applications des instruments sont expliqués dans chaque rubrique. On présente également des tableaux comparatifs des caractéristiques et des coûts relatifs des divers types d'instruments. Bien que ces tableaux ne permettent pas nécessairement de sélectionner des instruments de façon définitive, ils aideront à déterminer les types d'instruments les plus appropriés à une application spécifique. Par la suite, l'on pourra contacter les fournisseurs respectifs pour faire une analyse plus détaillée.

Mesure des variables de processus

Le tube de Bourdon est un exemple d'instrument indiquant directement la grandeur de la variable mesurée, cette variable étant la pression. Le tube agit lui-même comme capteur, et convertit directement la pression en une indication de pression. Par contre, avec bien d'autres instruments, la variable mesurée est convertie en une autre variable qui commande ensuite directement un appareil indicateur ou est reconvertie à son tour par un transmetteur produisant un signal de transmission. Par exemple, une variation de température peut provoquer des dilatations différentes à l'intérieur d'un bilame, ou créer une force électromotrice dans un thermocouple, ou engendrer une hausse de pression à l'intérieur d'un thermomanomètre à tension de vapeur, ou produire la dilatation d'un liquide comme dans un thermomètre à mercure.

Les signaux servant à indiquer les grandeurs mesurées sont beaucoup moins nombreux que les grandeurs physiques mesurables énoncées dans le chapitre sur les notions de base. Nous énumérons ci-après quelques-uns des signaux de mesure, avec leurs applications types.

Courant	(transmetteurs électroniques)
Force	(capteurs à équilibre de forces)
Fréquence	(compteurs volumétriques ou à turbine)
Impédance	(capteurs électroniques)
Mouvement d'un faisceau lumineux ou électronique	(oscilloscopes, galvanomètres)
Dilatation de liquide	(manomètres, thermomètres)
Déplacement	(capteurs à équilibre de déplacements)
Pression	(transmetteurs pneumatiques, capillaires à liquide)
Durée d'impulsions	(télémesure)
Modulation d'impulsions	(ordinateurs, collecteurs de données)
Tension	(potentiomètres)

Les transducteurs ont été mis au point pour convertir la plupart des grandeurs physiques en signaux de mesure ou de transmission. De multiples combinaisons de signaux peuvent être traités de façon économique à l'aide de microprocesseurs.

Catégories d'appareils de mesure

Il est nécessaire de recourir à diverses combinaisons d'appareils de mesure, de contrôle et de régulation automatique, pour exploiter efficacement un processus. L'exigence fondamentale pour toutes ces fonctions est la présence d'un instrument qui soit capable de capter avec justesse la variable mesurée et d'afficher sa valeur, ou qui soit capable de transmettre un signal à d'autres instruments qui l'interpréteront. Un instrument servant d'élément primaire est composé d'un certain type de capteur en contact avec le fluide ou la matière à mesurer, d'un dispositif amplificateur, et d'un autre dispositif indiquant la variable mesurée ou transformant l'impulsion initiale sous une certaine forme d'énergie ou de déplacement. Il existe de nos jours des appareils capables de capter et d'indiquer pratiquement toutes les caractéristiques physiques ou chimiques connues.

Capteurs à indication directe

Les premiers capteurs mis au point étaient des appareils enfermés dans un boîtier, qui percevaient la variable mesurée et l'affichaient directement en unités de mesure telles que °C, kPa et kg/h. Avec le temps, on découvrit d'autres avantages à associer les capteurs à des transmetteurs et transducteurs qui permettaient d'employer des indicateurs à distance, des boucles de régulation plus complexes et des salles de commande centralisée.

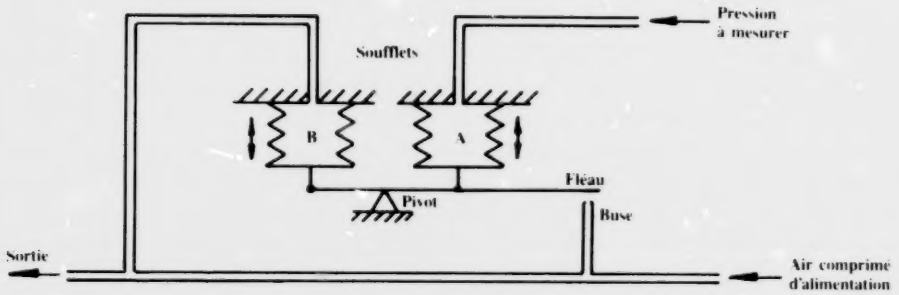


Schéma simplifié
d'un transmetteur pneumatique à équilibre de déplacements
Figure 5

Transmetteurs et transducteurs

Un *transmetteur* est défini comme étant «un appareil qui reçoit comme signal d'entrée la grandeur de la variable captée par un élément primaire, et l'exprime par un signal de sortie qui équivaut, selon une fonction prédéterminée, à la variable de processus». L'élément primaire peut être séparé ou intégré au transmetteur.

Un *transducteur* est un appareil qui reçoit l'information sous la forme d'une certaine quantité, et qui la convertit en une information équivalente, présentée sous la forme de la même quantité ou d'une autre quantité. On peut citer comme exemple un signal de 4-20 mA provenant d'un transmetteur, qui est converti en un signal pneumatique.

Un transmetteur pneumatique est un appareil qui capte une variable mesurée et la traduit sous la forme d'une pression d'air transmise à divers appareils récepteurs aux fins d'indication, d'enregistrement, de commande ou d'alarme.

Les transmetteurs pneumatiques, mis sur le marché à la fin des années 30, ont permis de regrouper les appareils de contrôle en salle de commande sans y amener de fluides potentiellement inflammables ou toxiques. En outre, l'utilisation de l'air comprimé a fourni un mode de signalisation présentant toutes garanties de sécurité dans les atmosphères explosives.

Le signal de pression nulle correspondant au zéro relatif «instantané», tel que 21 kPa (pression effective), révèle une panne d'alimentation d'air comprimé puisque le signal de sortie tombe alors à 0 kPa (eff.). En 1950, la plupart des fabricants d'instruments de mesure adoptèrent une gamme de mesure de 21 à 103,5 kPa (eff.), ce qui fut officiellement reconnu en 1958 par la Scientific Apparatus Makers Association (SAMA).

Un exemple simplifié du mécanisme d'un transmetteur pneumatique à équilibre de déplacements est montré dans la figure 5. Le soufflet «A» approche le fléau de la buse à mesure que la pression mesurée augmente. Cela fait augmenter la pression d'air captée par le soufflet «B qui repousse alors le fléau de la buse tant que l'équilibre n'est pas rétabli. Ainsi, le signal de sortie est proportionnel à la pression mesurée.

Les transmetteurs pneumatiques à équilibre de forces sont couramment employés de nos jours. On décrit ci-après leur mode de fonctionnement, que le lecteur comprendra facilement en se reportant à la figure 6.

- La pression à mesurer s'exerce sur la membrane souple, et la force résultante est équilibrée par la contre-pression de la buse qui tend à repousser la membrane vers le haut.
- L'air comprimé, alimenté sous une pression légèrement plus élevée que la pression maximale à mesurer, traverse la restriction, la buse et le siège pour atteindre la face inférieure de la membrane. Cette pression constitue le signal de sortie du transmetteur.
- Le circuit constitué par la chambre de pression et le dispositif à pression différentielle constante fournit une réserve supplémentaire d'air qui accélère la réponse, réduit le délai de transmission et compense toute fuite d'air.
- Le ressort à charge différentielle fournit, à l'état d'équilibre, une force égale à 21 kPa (eff.) contre la membrane. Par conséquent, la contre-pression de buse, qui s'exerce aussi sur le dessus de la membrane d'échappement, est toujours supérieure de 21 kPa (eff.) à la pression de service mesurée pour pouvoir présenter, au besoin, le signal de zéro relatif «instantané».

Les transmetteurs électropneumatiques sont également appelés convertisseurs ou transducteurs. Ils jouent un rôle extrêmement important puisqu'ils constituent le lien entre la quantité électrique mesurée et les systèmes pneumatiques. Un convertisseur électropneumatique type possède un signal électrique d'entrée de 4 à 20 mA et un signal pneumatique de sortie de 21 à 103,5 kPa (eff.). Ce genre d'appareil nécessite une pression d'alimentation de 140 kPa (eff.).

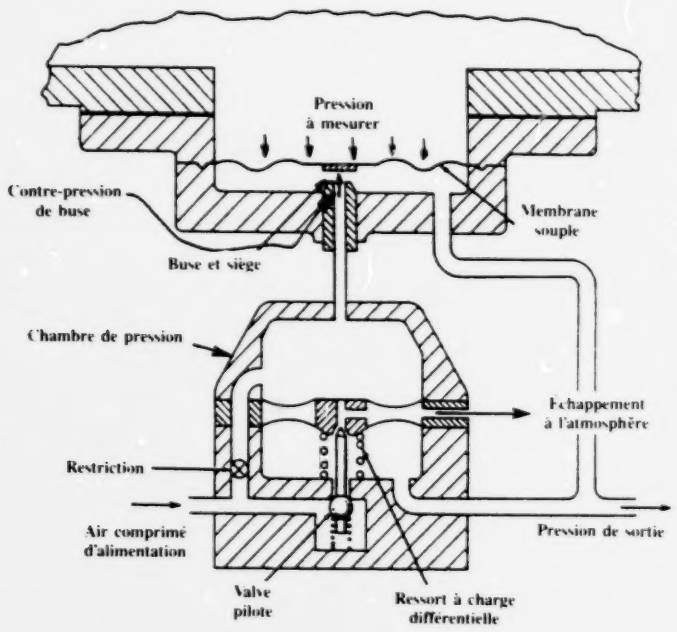


Schéma type
d'un transmetteur pneumatique à équilibre de forces
Figure 6

Transmission du signal de sortie

La plupart des appareils de mesure et de contrôle travaillent ensemble par l'intermédiaire d'un système de transmission compatible. Tout comme la langue anglaise et la langue française sont des formes de communication, on peut en dire autant des systèmes de transmission de signal de 4 à 20 mA ou de 21 à 103,5 kPa (eff.). Quant aux ordinateurs, ils emploient de nombreuses formes de communication, telles qu'en série, en parallèle, RS232, et le système DCB (décimal codé binaire). C'est autour des années 1940 et 1950 qu'apparut la notion de «télémesure» pour désigner la transmission des signaux électriques ou radioélectriques servant à présenter à distance les résultats de mesure des instruments.

Le sujet traité dans le présent module se limite aux transmetteurs pneumatiques et électroniques, mais il contient une brève introduction à la télémesure. La majeure partie des communications entre instruments sont réalisées par la conversion d'un signal analogique pneumatique ou électronique lorsqu'il s'agit de distances courtes ou moyennes, alors que la télémesure est le mode employé lorsqu'il s'agit de longues distances.

Le choix entre un transmetteur pneumatique ou électronique ne dépend pas de la décision d'employer un mode d'alimentation plutôt qu'un autre, mais plutôt des caractéristiques précises que l'instrument doit présenter pour l'application en cause. Les avantages et les désavantages des transmetteurs pneumatiques et électroniques sont donnés au tableau 1. La SAMA a normalisé la gamme de mesure de 21 à 103,5 kPa (eff.) pour les signaux pneumatiques et, heureusement, la plupart des fabricants s'y conforment. Une norme semblable fixant, pour les signaux électroniques, une gamme de 4 à 20 mA, est moins respectée par les fabricants, bien qu'elle demeure la plus couramment employée.

La télémesure est une forme de transmission des signaux par radio pour les distances supérieures à 1 500 mètres. La transmission de données par les sondes spatiales à la terre en est un exemple idéal.

COMPARAISON DES TRANSMETTEURS PNEUMATIQUES ET ÉLECTRONIQUES

TABLEAU 1

	Avantages	**Inconvénients**
Transmetteur pneumatique	• Investissement initial faible • Emploi sûr en atmosphère dangereuse • Compatibilité avec la plupart des élements de réglage final • Facile à comprendre • Insensible à une panne de courant momentanée	• Temps de réponse plus long • Transmission limitée à 200 m • Incapable de communiquer directement avec l'ordinateur • Exige un équipement d'air de commande de qualité • Risque de fuites dans les tubulures et les raccords • Exige une maintenance continuelle
Transmetteur électronique	• Délai de transmission négligeable • Distances de transmission jusqu'à 1 500 m • Compatible avec la plupart des ordinateurs • Conversion du signal non requise pour les éléments primaires tels que: débitmètre électromagnétique débitmètre à turbine, débitmètre à vortex • Les besoins de maintenance sont moindres. • Les coûts liés à l'énergie sont plus faibles.	• Investissement plus important • Équipment spécial requis en atmosphère dangereuse • Vulnérable en cas de panne d'électricité • Sensible à certains parasites radioélectriques • Conversion au mode pneumatique généralement nécessaire pour les éléments de commande • Plus grande technicité requise du personnel de maintenance • Matériel d'essai coûteux • Filerie spécifique pour prévenir la transmission de signaux erronés.

Mesure du débit

Débitmètres différentiels

Si l'on obstrue partiellement avec le doigt la sortie d'un boyau d'arrosage, on voit que le fait de réduire la section de passage augmente la vitesse d'écoulement. Le même effet se retrouve dans plusieurs types de débitmètres différentiels, tels que plaques à orifice, tuyères, tubes de Venturi, coudes calibrés et canaux-jaugeurs. Leurs modes de fonctionnement étant tous semblables, nous nous limiterons à décrire celui de la plaque à orifice. Un diaphragme est un élément primaire composé d'une plaque métallique circulaire comportant un orifice calibré. Cette plaque de diaphragme est fixée entre deux brides perpendiculairement au sens de circulation du fluide, pour réduire la section de passage (figure 7). L'augmentation de la vitesse d'écoulement du fluide traversant l'orifice est accompagnée d'une diminution de la pression statique en aval, et plus la vitesse d'écoulement augmente, plus la pression en aval diminue. Cela crée une différence de pression de part et d'autre de l'orifice, qui varie selon le débit. C'est cette pression différentielle qui est convertie en une indication de débit.

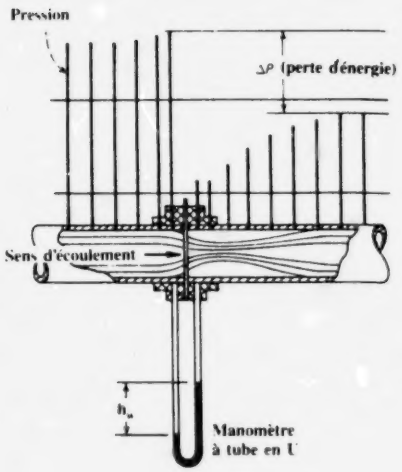
Il y a un rapport mathématique entre le débit traversant l'orifice et la pression différentielle mesurée de part et d'autre. Ce rapport peut être extrait directement de la courbe présentée à la figure 8, ou calculé d'après l'équation suivante:

$$\text{Pourcentage de la gamme de pression différentielle} = \left(\frac{\%\ \text{débit}}{100}\right)^2 \times 100$$

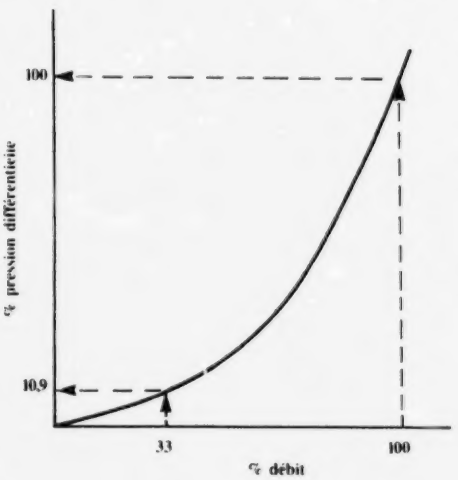
Le tableau 2 indique, pour une plaque à orifice, que la variabilité du débit est de 3:1, ce qui signifie qu'une plaque à orifice peut mesurer avec fiabilité tout débit se situant entre 100% et 33% du débit nominal. L'exemple suivant illustre l'effet sur la pression différentielle, lorsque le débit mesuré est à la limite du rapport, donc à 33% du débit nominal.

$$\text{Pourcentage de la gamme de pression différentielle} = \left(\frac{33}{100}\right)^2 \times 100$$

$$= 10{,}9\ \%$$



Diaphragme
Figure 7



Relation entre le débit et la pression différentielle
Figure 8

On peut confirmer cette valeur de 10,9% sur la courbe de la figure 8, à partir du débit de 33%. On suit la verticale jusqu'à la courbe, puis l'horizontale jusqu'à l'indication donnée, où on peut lire que la pression différentielle est bien de 10,9%. On peut refaire les calculs précédents pour déterminer le pourcentage de la gamme de pression différentielle correspondant au débit nominal de 100%.

$$\text{Pourcentage de la gamme de pression différentielle} = \left(\frac{100}{100}\right)^2 \times 100$$

$$= 100\ \%$$

Encore une fois, la figure 8 confirme qu'avec une pression différentielle correspondant à 100% de la gamme de mesure, on est en présence du débit nominal de 100%.

$$\text{Variabilité du débit} = \frac{100}{33}$$

$$= 3$$

Ce résultat peut être exprimé sous le rapport 3:1. Cependant, la variabilité admise pour la pression différentielle est beaucoup plus grande.

$$\text{Variabilité de la pression différentielle} = \frac{100}{10,9}$$

$$= 9,2$$

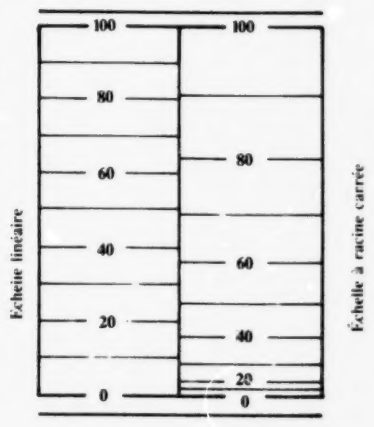
Ce résultat peut être exprimé sous le rapport 9,2:1. C'est ce rapport de variabilité de la pression différentielle qui limite l'emploi d'une plaque à orifice à une variation de débit de 3:1. Si le débit diminuait au-dessous de cette limite, la pression différentielle serait trop faible pour que l'instrument la mesure de façon fiable. Par exemple, prenons un transmetteur ayant un intervalle de mesure de pression différentielle de 30 kPa et une précision de ±1% de l'intervalle. Théoriquement, l'erreur de mesurage serait de 30 kPa x 0,01 = ±0,3 kPa. En reprenant la variabilité de la pression différentielle calculée précédemment à 9,2%, la pression différentielle serait de 30 kPa x 0,092 = 2,76 kPa.

$$\text{Précision de mesure} = \frac{\text{erreur} \pm}{\text{grandeur mesurée de la variable}}$$

$$= \frac{0,3}{2,76} \times 100$$

$$= \pm 10,9\ \%$$

Un débitmètre différentiel comporte une échelle de débit à racine carrée (figure 9). Il est à noter qu'on a beaucoup plus de facilité à lire sur l'échelle les débits les plus élevés.



Représentation d'échelles de débit linéaire et à racine carrée
Figure 9

Le profil de pression (figure 7) montre également que la pression en aval de l'orifice ne revient pas à la même valeur qu'en amont. Cette baisse de pression non récupérée, ou perte de charge, est une considération importante dans le choix de tout débitmètre à pression différentielle (tableau 2).

Il existe des débitmètres qui peuvent extraire mécaniquement la relation non linéaire. De tels appareils sont souvent employés pour mesurer les débits de vapeur, d'eau et de gaz naturel alimentant les chaudières. Ils offrent deux avantages: le premier est que la variabilité du débit est étendue à 4:1, et le deuxième avantage est que la courbe de débit est linéaire au lieu d'être à racine carrée (figure 9).

Pour assurer la précision maximale de la mesure d'un débit, il doit y avoir une certaine longueur droite de tuyauterie de part et d'autre de l'élément primaire. La longueur nécessaire varie selon la nature de l'élément et la disposition des conduites. Le tableau 2 indique les exigences à cet égard pour divers types de débitmètres.

DÉBITMÈTRES
TABLEAU COMPARATIF DES CARACTÉRISTIQUES ET DES COÛTS RELATIFS

TABLEAU 2

TYPE	SERVICE	COÛT RELATIF	PRÉCISION % INTERVALLE DE MESURE	PLAGE DE VARIABILITÉ	PERGE DE CHARGE	LONGUEUR DROITE MINIMALE DE CONDUITE (AMONT/AVAL)	CARACTÉRISTIQUE DU SIGNAL DE SORTIE
Plaque à orifice	Gaz, vapeur et liquides propres	M	1% à 3%	3:1	I	20:5	Racine Carrée
Tuyère, tube de Venturi	Gaz Liquides propres Boues (L) Mat. visqueuses (L)	M/É	0.5% à 3%	3:1	M	20:5	Racine carrée
Coude calibré	Gaz Liquides propres Boues (L) Mat. visqueuses	F	5% à 10%	3:1	N	30:10	Racine carrée
Déversoir et canal-jaugeur	Liquides propres Boues (L) Mat. visqueuses (L)	M	2% à 5%	30:1	M	En canal ouvert L'écoulement doit être calme à l'entrée	Linéaire dans certains modèles. La plupart ne le sont pas.
Tube de Pitot	Air, gaz Liquides propres	F	2% à 5%	3:1	F	40:10	Racine carrée
Débitmètre à turbine	Gaz Liquides propres Mat. visqueuses (L)	M	0.25% à 5% de la valeur indiquée	10:1	I	15:5	Linéaire
Compteur volumétrique	Gaz Liquides propres Mat. visqueuses (L)	M	0.15% à 1%	Gaz 100:1 Liquide 10:1	M/I	aucune	Linéaire
Débitmètre à section variable	Gaz Liquides propres Mat. Visqueuses (L)	F/M	0.5% à 5%	10:1	M	aucune	Linéaire
Débitmètre à vortex	Gaz, vapeur Liquides propres	M	0.5% à 1%	I	15:5	Linéaire	
Anémomètre à fil chaud	Gaz ou liquides	F	1% à 2%	20:1	M	5:3	Varie selon les manufacturiers
Débitmètre électro-magnétique	Liquides conducteurs Boues (L)	É	0.5% à 2%	30:1	N	aucune	Linéaire
Débitmètre ultrasonique à temps de transit	Liquides clairs	M/É	1%	20:1	N	15:5	Linéaire
Débitmètre ultrasonique à effet Doppler	Liquides clairs (avec bulles) Boues	M	2% à 10%	20:1	N	15:5	Linéaire
Débitmètre pour solides (balance)	Solides Boues	M/É	2% à 10%	20:1	F	5:3	Linéaire
Pompe	Liquides claires Boues Mat. visqueuses	F/M	0.1% à 1%	20:1	F	aucune	Linéaire

LÉGENDE

(L) – Limité
F – Faible
M – Moyen
É – Élevé
I – Importante
N – Nulle
M/I – Moyenne/Importante

Débitmètres à sondes de pression

La pression totale d'un écoulement d'air dans un conduit est la somme de la pression statique exercée sur les parois du conduit, et de la pression dynamique de l'air en mouvement (figure 10). Le tube de Pitot représenté est un appareil couramment employé pour mesurer la pression dynamique. Afin d'obtenir une valeur exacte de la pression dynamique, des lectures doivent être prises dans toute la section transversale du conduit, tel que montré à la figure 10. La pression dynamique doit être calculée pour chaque position, et on doit calculer la moyenne des valeurs obtenues. La pression dynamique du fluide dans un conduit peut être calculée par l'équation suivante :

$$Va = 0{,}764 \times \left(\frac{T \times Pv}{B}\right)^{0{,}50}$$

dans laquelle Va = vitesse moyenne (m/s)

T = température (K)

Pv = pression dynamique (Pa)

B = pression barométrique (absolue) (kPa)

0,764 = constante de l'équation et coefficient de conversion des unités.

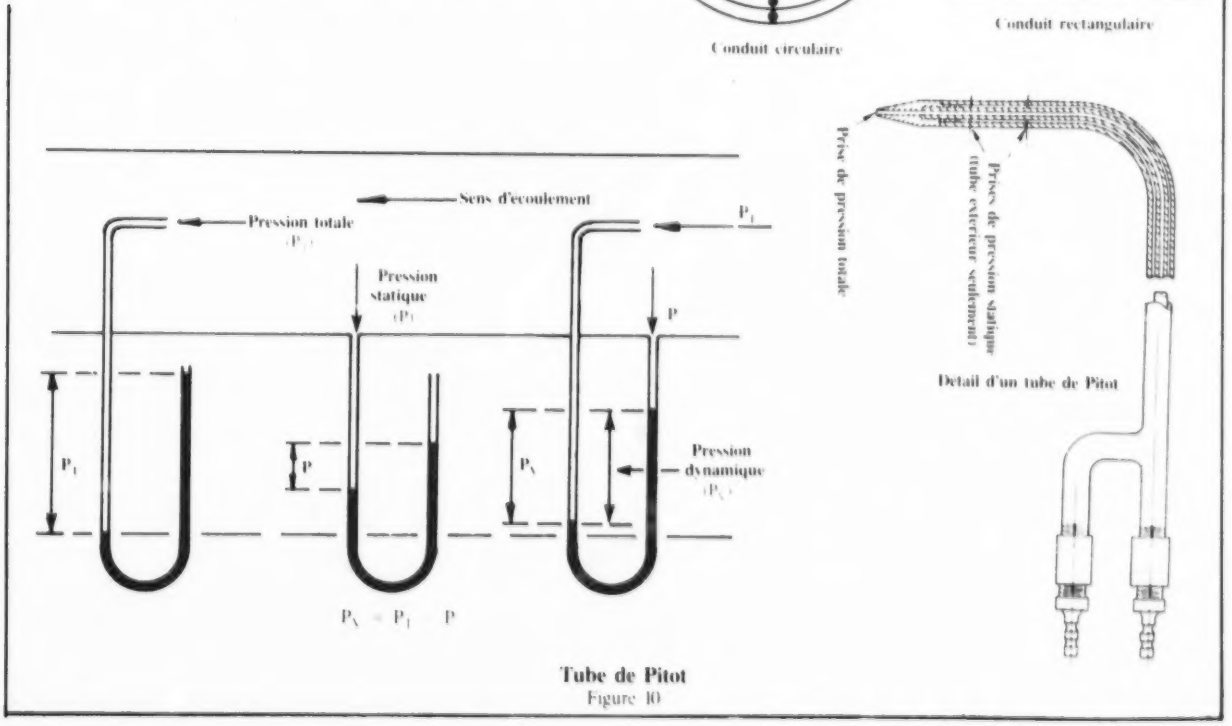
Le calcul du débit correspondant peut alors se faire d'après l'équation ci-après :

$$Q = Va \times Ad \times 1\,000$$

dans laquelle Q = débit (L/s)

Ad = section du conduit (m^2)

1 000 = coefficient de conversion des unités.



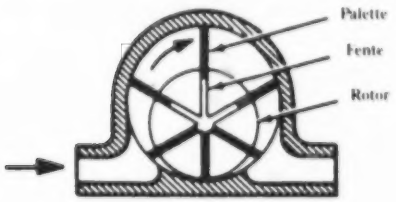
Tube de Pitot
Figure 10

Un tube de Pitot jumelé à un manomètre est souvent employé pour déterminer le débit d'air dans un conduit afin de calculer le rendement d'un ventilateur et d'équilibrer la distribution de l'air dans les systèmes de conditionnement de l'air.

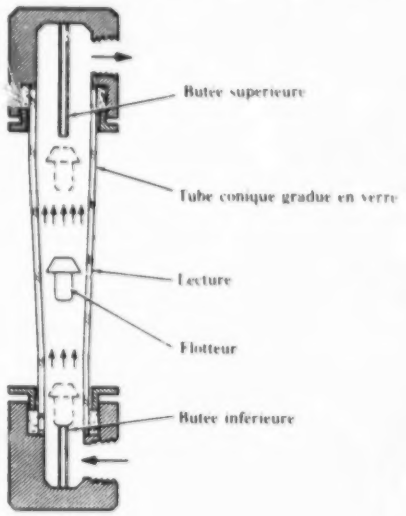
La vitesse de l'air peut être mesurée avec une précision de 2 à 5 % selon le soin apporté aux lectures des sondes transversales.

Débitmètre à turbine

Un débitmètre à turbine fonctionne sur le principe des moulins à vent. Ce type d'appareil peut servir à mesurer le débit d'un liquide ou d'un gaz dans une conduite. Une turbine à pales multiples est insérée dans l'écoulement du fluide, ce qui lui donne un mouvement de rotation. La vitesse de rotation de la turbine est directement proportionnelle au débit, et cette vitesse est convertie en un signal de sortie électrique ou mécanique. Dans le tableau 2, on voit que les débitmètres à turbine ont une plus grande variabilité de mesure (10:1) que les débitmètres différentiels (3:1), et qu'ils sont d'une plus grande précision.



Compteur volumétrique
Figure 11



Débitmètre à section variable
(rotamètre)
Figure 12

Compteur volumétrique

Un compteur volumétrique découpe l'écoulement en volumes précis dont il compte le nombre à mesure qu'ils traversent l'appareil. Il existe plusieurs modèles de compteurs volumétriques, mais un des plus simples est le compteur à palettes (figure 11).

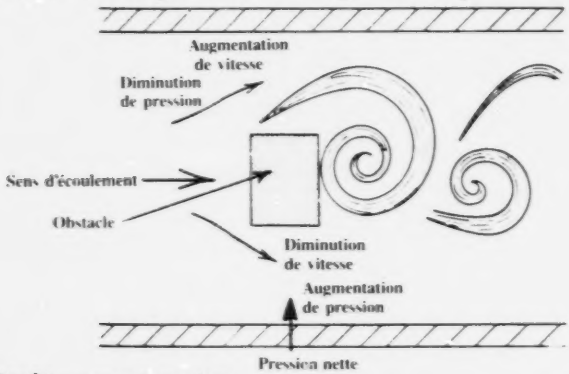
Le rotor, qui peut tourner librement, est mis en rotation par l'action du fluide sur les palettes. Les palettes, qui ressortent en alternance des fentes du rotor, sont construites de façon qu'elles viennent en contact parfaitement étanche avec le contour de l'appareil. Ainsi, un volume précis de fluide se trouve enfermé entre deux palettes consécutives qui lui font traverser le compteur. Ce type de compteur mesure les volumes directement avec une bonne précision (0,5 à 10,0 %) et en admettant une grande variabilité de débit, soit d'au moins 10:1 pour les liquides et 100:1 pour les gaz (tableau 2). C'est la raison pour laquelle les compteurs volumétriques à palettes sont souvent employés dans les applications où le débit est mesuré aux fins de facturation.

Débitmètre à section variable

Le débitmètre à section variable, souvent appelé rotamètre, est un tube conique transparent comportant un flotteur à l'intérieur (figure 12). Cet instrument est monté verticalement de sorte que le fluide pénètre par le dessous et sort par le dessus. Le flotteur restreint la section de passage du fluide, ce qui crée une pression différentielle de part et d'autre. Cette différence de pression associée à la poussée intrinsèque du flotteur contrebalance le poids du flotteur et le fait monter dans le fluide. À mesure que le débit augmente, il se produit aussi une augmentation de pression différentielle qui fait remonter le flotteur. Et à mesure que le flotteur monte, la section qui l'entoure augmente à cause de l'élargissement du tube. Cet élargissement provoque une diminution de la pression différentielle au niveau du flotteur, jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse. Ainsi, la position du flotteur dans le tube est proportionnelle au débit passant, et la surface du tube peut être calibrée avec une échelle graduée en unités de débit.

Débitmètre à vortex

Le débitmètre à vortex fonctionne sur le principe qu'un objet fixe (non aérodynamique) inséré dans l'écoulement, le perturbe et provoque des tourbillons creux, ou vortex (figure 13). Ces tourbillons sont provoqués en alternance par l'un et l'autre côté de l'obstacle, créant des pulsations de pression semblables à celles qui font s'agiter un drapeau flottant au vent. La fréquence des pulsations est proportionnelle au débit, et cette fréquence est mesurée et convertie électriquement en un signal correspondant au débit.



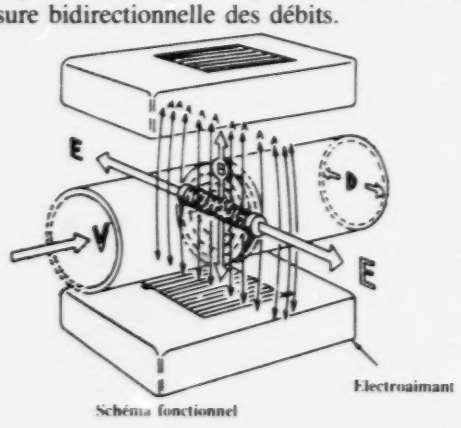
Débitmètre à vortex
Figure 13

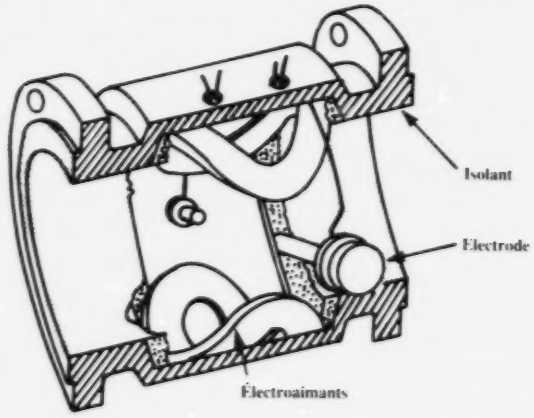
Débitmètres sans contact

Tous les débitmètres que nous avons vus jusqu'ici exigent l'insertion d'un élément quelconque à l'intérieur de l'écoulement. Ce sont donc des appareils de mesure par contact. Cela peut constituer un inconvénient en raison des baisses de pression non récupérées en aval (pertes de charge), et du risque de blocage ou de contamination des instruments et des tubulures de raccord par des matières en suspension dans le fluide mesuré. Nous allons voir maintenant trois types de débitmètres sans contact, dont la conception élimine ces problèmes.

1. Le *débitmètre électromagnétique* fonctionne d'après la loi de Faraday concernant l'induction électromagnétique, selon laquelle une tension est engendrée dans un conducteur lorsque ce conducteur est déplacé dans un champ électromagnétique. La valeur de la tension ainsi produite est proportionnelle à la conductance, laquelle varie d'après le volume de fluide traversant la conduite et d'après la résistance du champ magnétique. C'est là le principe de fonctionnement des génératrices, et ce même principe sert à mesurer le débit d'un liquide électroconducteur (figure 14).

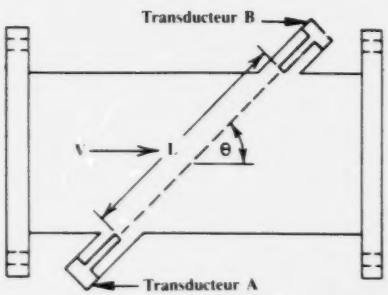
Une bobine magnétique est montée de chaque côté d'une conduite. Lorsque les bobines sont excitées par une tension déterminée, un champ électromagnétique constant s'établit en travers de la conduite. Lorsqu'un liquide électroconducteur circule à l'intérieur de la conduite, donc traverse le champ magnétique, il se comporte comme un conducteur et une tension est engendrée dans le liquide. La tension est proportionnelle à la vitesse d'écoulement du fait que la résistance du champ magnétique est fixe. Deux électrodes insérées de part et d'autre de la conduite à 90° par rapport aux bobines, captent la valeur de la tension produite, et cette valeur est ensuite amplifiée et retransmise à un dispositif générateur de signal de sortie. Les débitmètres électromagnétiques coûtent cher, particulièrement pour les conduites de grand diamètre, mais ils offrent de nets avantages, tels qu'un écoulement non perturbé, aucune perte de charge, une grande variabilité de débit, aucune nuisance si le fluide est chargé de particules, et la mesure bidirectionnelle des débits.





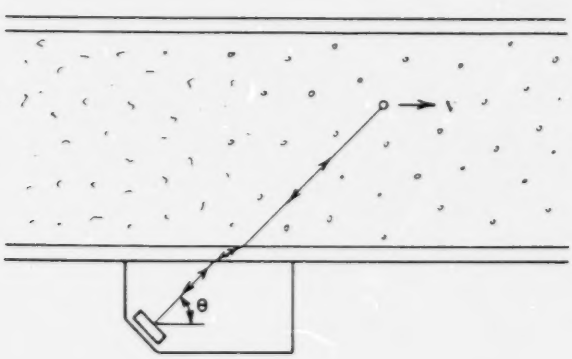
Débitètre électromagnétique
Figure 14

2. Le *débitmètre ultrasonique à temps de transit* convient seulement aux débits de liquides. Cet appareil comporte deux transducteurs à ultrasons, montés l'un en face de l'autre sous un certain angle de part et d'autre de la conduite (figure 15). Chaque transducteur émet des impulsions ultrasoniques et en reçoit du transducteur opposé. Si le liquide dans la conduite est immobile, le temps que prend les ultrasons pour passer de A à B et de B à A est le même. Mais si le liquide est en mouvement, le temps de parcours des impulsions allant de A à B diminue, alors que de B à A, il augmente. Cette différence de temps est proportionnelle à la vitesse d'écoulement du liquide, et sa valeur est convertie en un signal de débit. De tels débitmètres peuvent être relativement précis lorsqu'ils sont conçus pour une application spécifique. Cependant, ils sont affectés par la présence de matières en suspension ou de bulles à l'intérieur de l'écoulement.



Débitmètre ultrasonique à temps de transit
Figure 15

3. Le *débitmètre ultrasonique à effet Doppler* comporte un seul transducteur, qui est généralement monté à l'extérieur de la conduite (figure 16). Pour que cet appareil soit efficace, il doit y avoir des matières en suspension ou des bulles dans le fluide. L'appareil émet des impulsions ultrasoniques et mesure la fréquence des impulsions réfléchies par les matières en suspension ou les bulles. La fréquence ainsi captée est proportionnelle à la vitesse d'écoulement du liquide, et sa valeur est convertie en un signal de débit. Ces appareils sont transportables, et on peut fixer le transducteur par courroies à pratiquement n'importe quelle diamètre de tuyauterie. La précision de mesure de cet appareil est pauvre.



Débitètre ultrasonique à effet Doppler
Figure 16

Pompes

Une *pompe volumétrique* peut servir à la mesure du débit, ainsi que plusieurs types de pompes à volumes contrôlés. Lorsque ces pompes sont conçues pour la mesure, le contrôle de leurs fuites internes permet la précision de mesure nécessaire. Les pompes à membrane, à piston, à engrenages, les pompes péristaltiques et certaines pompes à vis sont employées pour la mesure. Un des avantages des pompes est qu'elles peuvent mesurer des fluides difficiles à manipuler tels que les boues et les liquides visqueux.

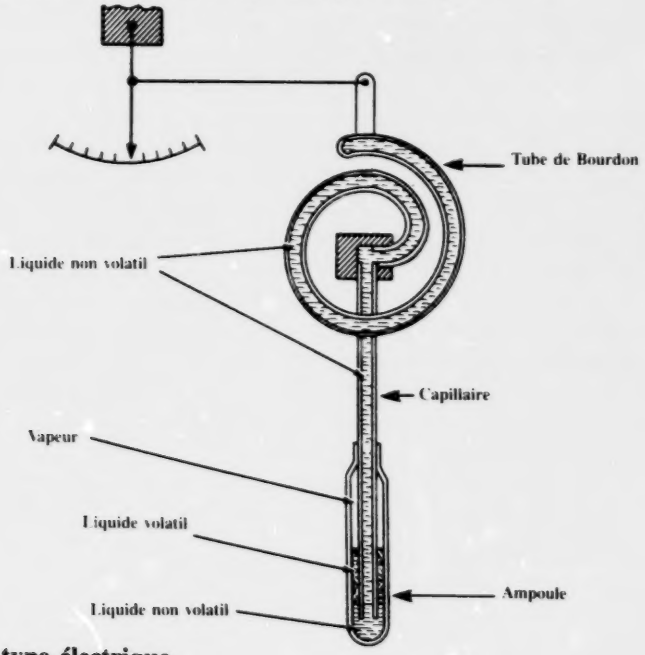
Mesure de la température

Les méthodes de mesure de la température sont étudiées sous deux grandes rubriques: les thermomètres de type mécanique et les thermomètres de type électrique.

Thermomètres de type mécanique

Les *thermomètres à dilatation* fonctionnent sur le principe que la plupart des métaux, des gaz et des liquides se dilatent et se contractent selon les variations de leur température. Dans cette catégorie, les types de thermomètres sont très nombreux.

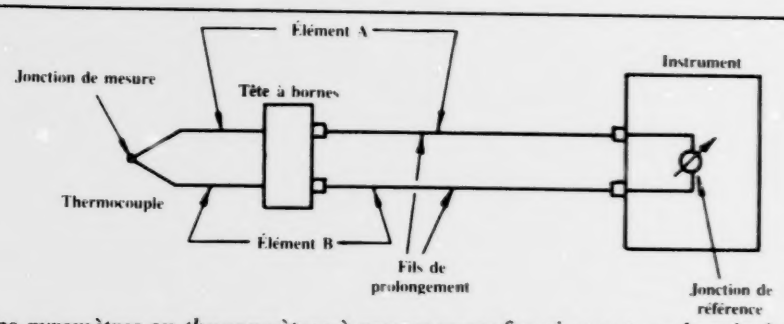
- Les *thermomanomètres* ou *thermomètres à variation de pression* sont essentiellement des dispositifs de mesure de la pression comportant un indicateur de pression raccordé, au moyen d'un tube fin ou d'un capillaire étanche au gaz, à une ampoule remplie de gaz, liquide ou vapeur sous pression (figure 17). On insère l'ampoule dans le fluide à mesurer, et toute variation de température reproduite dans l'ampoule se traduit par une variation de sa pression intérieure, et cette variation de pression fait déplacer le curseur. Ces appareils existent en plusieurs catégories, définies pour des applications légèrement différentes. Il est donc recommandé de consulter le fabricant pour s'assurer qu'une catégorie particulière convient bien à une utilisation spécifique. Le tableau 3 énumère certaines caractéristiques de chaque catégorie.
- Les *thermomètres à bilame* sont construits à l'aide de deux minces lames de métal ayant des coefficients de dilatation thermique différents, ces lames étant fixées ensemble sur une bobine. Lorsqu'il se produit une variation de température, les deux métaux se dilatent ou se contractent à des taux différents, ce qui a pour effet que la bobine se serre ou se desserre. Ce mouvement, semblable à celui qui se produit dans un manomètre, détermine la position d'un curseur qui indique la température.



Thermomanomètre
Figure 17

Thermomètres de type électrique

- Les *thermocouples* ou *thermomètres à couples thermoélectriques* sont basés sur le principe qu'une tension proportionnelle à la température est produite lorsque deux métaux différents sont joints et que la jonction est chauffée. Ce principe bien simple (figure 18) est largement employé pour l'indication ou l'enregistrement à distance des températures.
- Les *thermomètres à résistance* sont basés sur le fait que la résistance électrique de certains métaux augmente lorsque leur température monte. Cette variation de résistance est mesurée et convertie en un signal de sortie de température. Les métaux généralement employés sont le platine, le nickel, un alliage de nickel et de fer, et le cuivre. Ces appareils peuvent coûter cher selon le métal employé, cependant ils sont précis et ils offrent d'excellentes qualités de répétabilité et de stabilité à long terme. Les thermomanomètres au platine sont les dispositifs reconnus internationalement pour la mesure des températures entre -259,19°C et 630,75°C.



Thermocouple
Figure 18

- Les *pyromètres* ou *thermomètres à rayonnement* fonctionnent sur le principe que les objets émettent différentes intensités de rayonnement selon leur température. Ces instruments peuvent mesurer le rayonnement sans être en contact direct avec l'objet soumis à la mesure, et ils convertissent ce rayonnement en un signal de température. En général, on s'en sert comme des appareils portatifs pour les vérifications périodiques, mais ils peuvent également être installés en permanence. Il existe plusieurs modèles, dont les applications vont de la mesure de la température du métal fondu jusqu'à l'établissement des profils de déperdition thermique des bâtiments.

Le tableau 3 donne un résumé des caractéristiques et des coûts relatifs de plusieurs types courants de thermomètres.

THERMOMÈTRES
TABLEAU COMPARATIF DES CARACTÉRISTIQUES ET DES COÛTS RELATIFS

TABLEAU 3

TYPE	GAMME DE MESURE RECOMMANDÉE	COÛT RELATIF	PRÉCISION: % INTERVALLE DE MESURE	RÉPÉTABILITÉ	TEMPS DE RÉPONSE
Thermomètre à tube de verre	−50 à +800°C	F	1% à 2%	Exc.	B
Thermomanomètre*					
Liquide	−30 à +400°C		0,1% à 2%	P	B
Vapeur	−15 à +300°C	F/M	0,5% à 2%	P	P
Gaz	−265 à +800°C		0,5% à 2%	P	B
Mercure	−40 à +650°C		0,5% à 2%	P	P
Bilame	−60 à +425°C	F	1% à 4%	P	B
Thermocouple					
Type T	−150 à +260°C		0,3% à 1%	B/Exc	Exc
Type J	−160 à +800°C	F/M	0,3% à 1%	B/Exc	Exc
Type K	−150 à +1 500°C		0,3% à 1%	B/Exc	Exc
Type R & S	−15 à +1 700°C		0,3% à 1%	B/Exc	Exc
Thermomètre à résistance					
Nickel	−150 à +260°C	F/M	0,1%	E	B/Exc
Platine	−255 à +650°C	M/É	0,1%	E	B/Exc
Pyromètre					
Optique	+760 à +3 500°C	M/É	1% à 2%	–	P/B
À infrarouge	0 à −3 300°C		1% à 2%	–	Exc
À radiations	500 à +3 900°C	É	0,5% à 1%	B/Exc	B

* Ce type est non linéaire; certains ne peuvent mesurer qu'au dessus ou au-dessous de la température ambiante.

LÉGENDE

F	– Coût faible	É	– Coût élevé	B.Exc	– Bonne
M	– Coût moyen	Exc.	– Excellent	P	– Passable

Mesure de la pression

La pression peut être mesurée à l'aide de manomètres à colonne de liquide, à tube de Bourdon, à soufflet ou à membrane, ou encore à l'aide de jauges de contraintes. Le graphique de la figure 19 définit le rapport entre la pression absolue et la pression effective. Le tableau 4 présente les caractéristiques et les coûts relatifs de divers manomètres.

Manomètres à colonne de liquide

Les manomètres à colonne de liquide mesurent la hauteur d'une colonne de liquide dont le poids est en équilibre avec la pression exercée. Par l'exemple d'un manomètre à tube en U (figures 7 et 10), on voit comment le déplacement donne directement la mesure de la hauteur du liquide. Cet instrument ne comporte aucune pièce mécanique mobile, et il ne s'y produit pratiquement pas de frottement ni d'inertie. La précision de mesure est limitée seulement par la précision de la lecture et par la densité du liquide de référence. Les tubes en U sont très souvent employés comme appareils d'étalonnage des autres types de manomètres.

La pression est normalement exprimée par l'équation suivante:

$$P = 0{,}102 \times h \times D$$

dans laquelle P = pression (Pa)

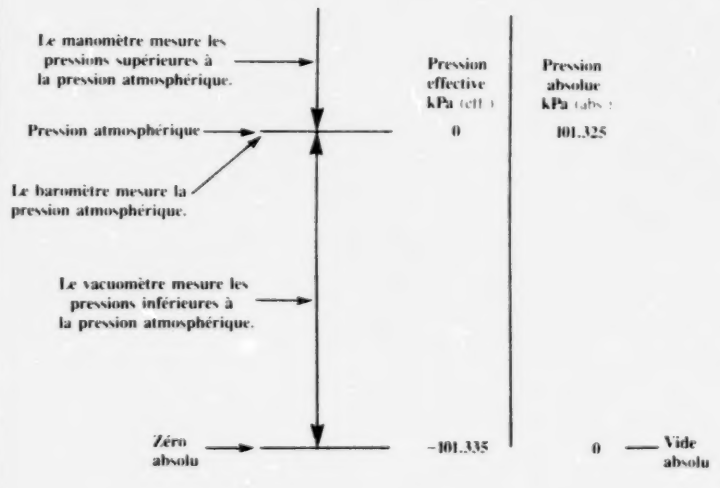
h = hauteur de liquide (m)
(normalement en mm, qu'on divise ici par 1 000 pour obtenir l'équivalent en mètres)

D = masse volumique du liquide (kg/m^3)

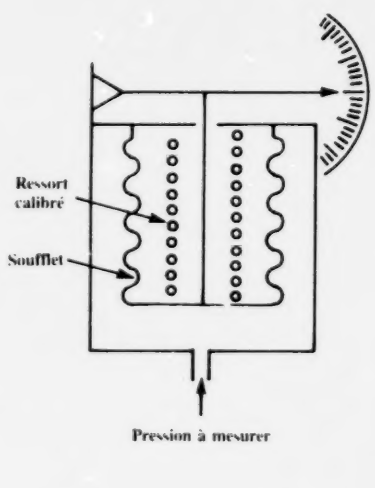
0,102 = pour la conversion des kg/m^3 en Pa

Si le côté haute pression est rempli d'un liquide de référence dont la masse volumique diffère considérablement de celle du liquide mesuré, le résultat de mesure doit être corrigé pour tenir compte du poids de ce liquide, et l'équation devient:

Pression = (0,102 x h x masse volumique du liquide de réf.) − (0,102 x h x masse volumique du liquide mesuré)



Termes des mesures de pression
Figure 19



Manomètre à soufflet
Figure 20

Manomètres à tube de Bourdon, à soufflet et à membrane

Dans les manomètres à tube de Bourdon, à soufflets et à membrane, un mécanisme se déforme sous l'effet d'une variation de pression et reprend sa forme initiale lorsque la pression cesse d'être exercée. Dans le manomètre à tube de Bourdon (figure 3), c'est le tube qui réagit à la pression, et son mouvement est transmis par une tringlerie et des engrenages pour positionner un curseur. Le manomètre à soufflet montré dans la figure 20 comporte un ressort calibré, mais ce n'est pas toujours nécessaire. Ce genre de manomètre compte deux soufflets opposés s'il est destiné à mesurer une pression différentielle. Quant au manomètre à membrane, son élément sensible est une membrane plane ayant une certaine «souplesse» à son pourtour, qui lui permet de se déplacer (figure 6). Puisque les manomètres à membrane sont les moins affectés par les variations de température ambiante et par l'hystérésis élastique, ils sont plus précis que les manomètres à tube de Bourdon et à soufflet.

Jauges de contraintes

Les jauges de contraintes fonctionnent sur le principe que la résistance électrique d'un conducteur métallique varie lorsque ce conducteur est soumis à une contrainte mécanique. La contrainte étant exercée sur le conducteur métallique par la pression que l'on veut mesurer, la variation de résistance qui en résulte est amplifiée électriquement pour produire un signal de sortie de pression. L'avantage de cette méthode est que la contrainte peut être mesurée même en présence d'un mouvement extrêmement faible du capteur de pression. Cela élimine la plupart des imprécisions mécaniques que présentent les manomètres à tube de Bourdon et à soufflet.

MANOMÈTRES
TABLEAU COMPARATIF DES CARACTÉRISTIQUES ET DES COÛTS RELATIFS

TABLEAU 4

TYPE	SERVICE		COÛT RELATIF	PRÉCISION: % INTERVALE DE MESURE	PRESSION MAXIMALE (kPa)
	GAMME DE PRESSION ABSOLUE (kPa)	GAMME DE PRESSION EFFECTIVE (kPa)			
Colonne de liquide	0-410	0-410	F/M	0,1% to 1%	40 000 (normalement employé pour basse pression)
Tube de Bourdon		0-690 000	F/M	0,25% à 5%	690 000
Soufflet	0-240	0-14 000	M	1%	41 000
Membrane	0-350	0-1 400	M/É	0,5% à 1%	10 000
Jauge de constraintes		0- 1 400 000	H	0.1% à 1%	1 400 000

LEGEND

F — Coût faible
M — Coût moyen
É — Coût élevé

NIVEAUMÈTRES
TABLEAU COMPARATIF DES CARACTÉRISTIQUES ET DES COÛTS RELATIFS

TABLEAU 5

TYPE	SERVICE	GAMME DE MESURE (mètres)	COÛT RELATIF	PRÉCISION: % INTERVALLE DE MESURE	PRESS./TEMP.
Tube de niveau	Liquides propres Boues (L) Mat. visqueuses (L)	2.5	F/M	(±6 mm type)	69 000 kPa 370°C
Flotteur	Liquides propres Boues (L) Mat. visqueuses (L)	Étroite ou illimitée selon le type	F	0.5% à 1.0%	7 000 kPa 260°C
Plongeur	Liquides propres	3	F/M	0.5%	4 000 kPa 450°C
Détection de surface (Yo-Yo)	Solides Liquides propres Boues (L)	30	M	1% à 5%	2 000 kPa 150°C
Pression différentielle	Selon le type. Liquides propres Boues (L) Mat. visqueuses (L) Solides (L)	Illimitée	F/M	0.3% à 5%	Basse à 100 000 kPa 100°C
Sondes électriques (capacitance, inductance)	Liquides propres Boues Solids (L)	45	F/M	0.5% à 3%	7 000 kPa 800°C
Ultrasons	Liquides propres Boues Mat. visqueuses Solides	30 - air 600 - liquide	F/M	1% à 3%	1 000 kPa 100°C
Radiations	Convient aux matières difficiles à manipuler	15	M	1% à 2%	Pression non considérée. Temp.: 100 °C
Bulles	Liquides en réservoir sous pression ou à la pression atmosphérique	20	F	1% à 2%	0 à 700 kPa 200 °C
Poids	Liquides ou solides Convient aux matières difficiles à manipuler (solides)	Limitée seulement par les dimensions du réservoir	É	0.1% à 1%	Pression non considérée. Temp.: 500 °C

LÉGENDE

(L) — Limité
F — Coût faible
M — Coût moyen
É — Coût élevé

Mesure du niveau

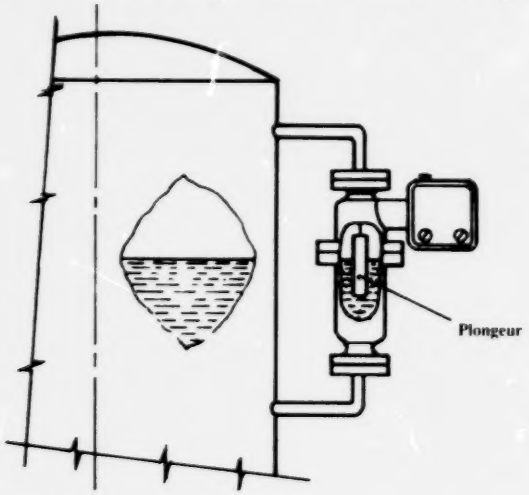
La mesure du niveau peut être simple, mais il existe beaucoup d'applications complexes où cette mesure devient difficile. Avant de choisir un niveaumètre en particulier, il faut étudier avec soin tous les facteurs susceptibles de compliquer les mesures, soit:

- réservoir ouvert ou sous pression
- turbulence
- caractéristiques des solides contenus dans les bacs
- détection d'interface
- moussage (écume)
- solidification
- changement de composition dû à la présence de bulles d'air
- effets de contraction et de gonflement dans les chaudières
- température des matériaux.

Les appareils de mesure du niveau que nous allons expliquer sont le tube de niveau et les niveaumètres mécaniques, pneumatiques et électriques. Le tableau 5 présente les caractéristiques et les coûts relatifs de divers niveaumètres.

Tube de niveau

Cet instrument consiste tout simplement en un tube de verre dont le sommet est ouvert et le bas est raccordé à la partie inférieure du réservoir à mesurer. Le niveau du liquide dans le tube correspond au niveau du liquide contenu dans le réservoir, ce qu'on peut observer par lecture directe. Si le réservoir est sous pression, le sommet du tube doit être raccordé, lui aussi, au réservoir. Lorsqu'il s'agit de mesurer le niveau sous des pressions relativement élevées, on emploie un tube métallique dont la fenêtre de lecture est constituée par un verre plat de forte épaisseur.



Niveaumètre à plongeur
Figure 21

Niveaumètres à action mécanique

- Un *niveaumètre à flotteur* est un appareil mécanique élémentaire pour la mesure du niveau. Le mouvement du flotteur transmis par des câbles, des tringles ou d'autres modes de liaison, est converti en une indication de niveau.
- Un *niveaumètre à plongeur* est basé sur le principe d'Archimède, selon lequel un corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale ascendante, égale au poids du fluide déplacé. Cela signifie qu'un plongeur fabriqué d'une matière plus lourde que le liquide à mesurer peut servir à déterminer son niveau (figure 21). À mesure qu'augmente le niveau du liquide dans lequel le plongeur se trouve, la poussée vers le haut qu'il subit augmente aussi. Le faible déplacement que subit alors le fléau relié au plongeur est proportionnel à la variation du niveau, et sa grandeur est amplifiée pour produire une indication du niveau. Le principal avantage est que le mouvement à mesurer est relativement faible en comparaison de celui d'un flotteur, pour la même variation de niveau.

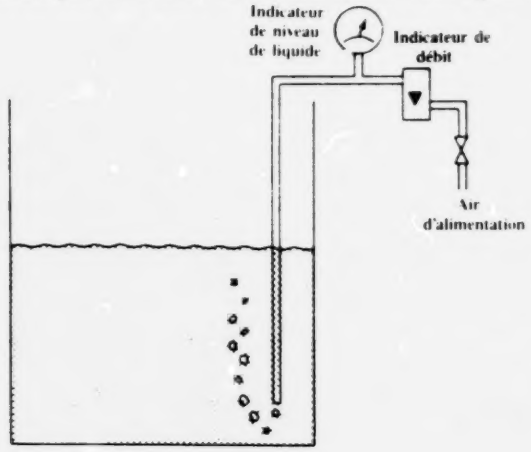
- Les *niveaumètres à détection de surface* servent surtout à mesurer le niveau des solides contenus dans des bacs. Leur principe est le même que celui des sondes de profondeur qu'employaient les marins de l'antiquité lorsqu'ils «sondaient» le fond. Un poids est abaissé dans le bac au bout d'un câble, et lorsque le poids touche le «fond», la tension du câble diminue, ce qui est détecté par une balance qui commande la remontée du câble, et la longueur de remontée du câble est mesurée par un compteur fixé au tambour. Ces instruments sont parfois appelés des «Yo-yo» en raison de leurs mouvements successifs de descente et de remontée. L'encrassement du câble par des particules de la matière stockée et même la corrosion peuvent nuire au fonctionnement.

Niveaumètres à pression

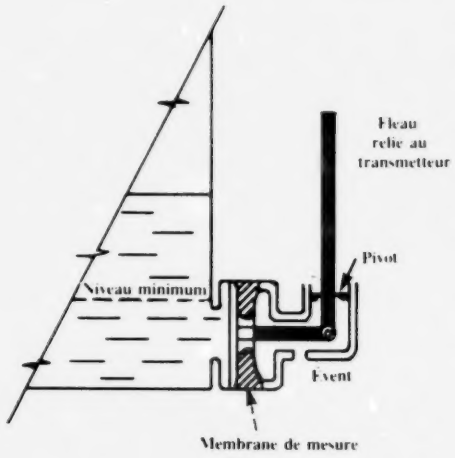
Un niveau de liquide peut être déterminé par la mesure d'une pression. Un exemple courant est l'emploi d'un manomètre à membrane, à soufflet ou à tube de Bourdon qui convertissent la pression causée par la colonne de liquide en une indication de niveau.

Le *niveaumètre à bulles* (figure 22) permet de mesurer le niveau d'un liquide sans que l'instrument soit en contact avec le liquide lui-même. Cette technique est utile lorsque le liquide est corrosif, lorsqu'un raccord en pleine paroi risquerait de s'obstruer ou lorsque l'emploi d'un tel raccord ne serait pas pratique. L'alimentation d'air est réglée pour que seule une petite veine d'air traverse un indicateur de débit d'air vers la conduite de sortie des bulles, sous une pression juste assez grande pour que cet air parvienne à s'échapper par l'extrémité de la conduite de sortie de bulles. Ainsi, la pression d'air mesurée peut être considérée comme équivalant à la pression statique exercée par la hauteur du liquide.

Le *niveaumètre à membrane* (figure 23) est utilisé dans le cas d'un réservoir ouvert. Le niveau du liquide exerce une pression sur la membrane, cette pression fait se déplacer la tringlerie, et le déplacement de cette tringlerie est transféré par le fléau à un transmetteur qui émet un signal représentatif du niveau. Cet instrument peut être modifié pour mesurer le niveau dans un appareil sous pression. Dans ce cas, la chambre du côté de la membrane opposé au liquide est modifiée pour admettre la pression provenant du haut du réservoir. Ainsi, la différence de pression de part et d'autre de la membrane reste égale à la pression correspondant à la hauteur du liquide.



Niveaumètre à huiles
Figure 22

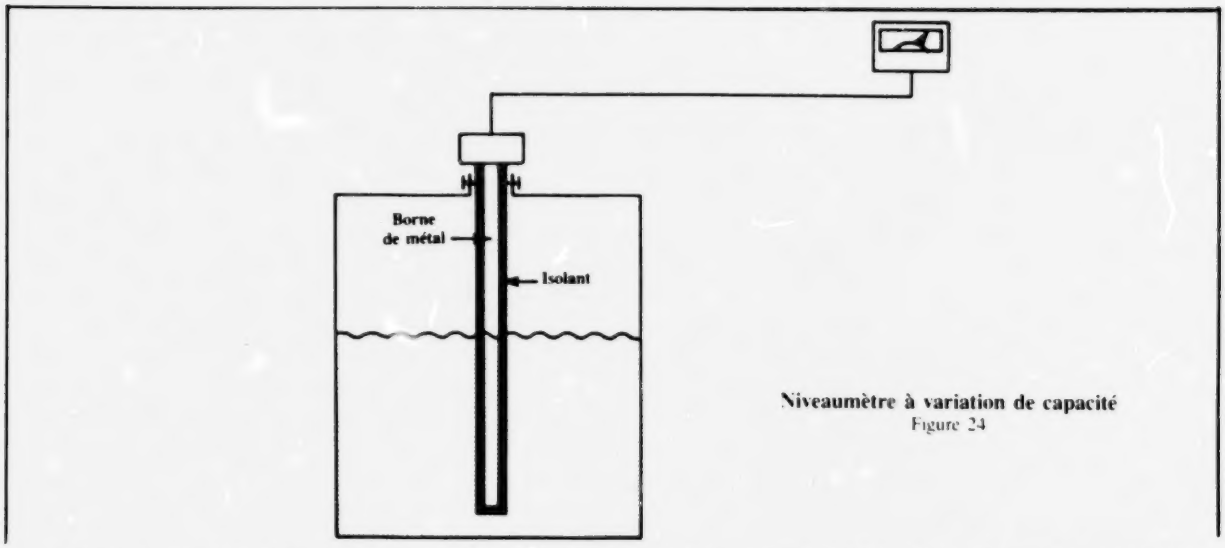


Niveaumètre à membrane
Figure 23

Niveaumètres à action électrique

Plusieurs instruments captent le niveau à l'aide de mesures électriques.

- Des sondes capacitives déterminent le niveau de liquide dans un réservoir en mesurant la capacité entre les plaques d'un condensateur. Pour les liquides, qui sont de bons conducteurs d'électricité, une sonde se compose d'une barre de métal recouverte d'un isolant (figure 24). Lorsque le niveau du liquide conducteur monte, la capacitance entre la barre de métal et les parois conductrices du réservoir augmente. Une sonde pour les liquides diélectriques (semi-conducteurs) se compose d'une borne de métal à l'intérieur d'un tube de métal. La montée du liquide entre la barre et le tube détermine la capacité qui est mesurée.



Niveaumètre à variation de capacité
Figure 24

- Les *niveaumètres ultrasoniques* travaillent sur le même principe que les débitmètres ultrasoniques. Une impulsion est émise par un transducteur, et on mesure le temps qu'elle met à être réfléchie par la surface du contenu du réservoir. Ces instruments peuvent être employés avec des liquides aussi bien qu'avec des solides, et ils peuvent également servir à détecter l'interface entre deux matières non miscibles, comme l'huile et l'eau.
- Les *niveaumètres à rayonnement* sont utiles dans le cas de matières ou de situations difficiles à mesurer, lorsqu'il n'est pas possible de pratiquer un trou dans la paroi du bac. Un émetteur de radiations est placé d'un côté du bac, et un détecteur de l'autre côté. Les radiations sont partiellement absorbées par la matière contenue dans le bac, et le degré d'absorption varie à mesure que le niveau change. La variation des radiations captées par le détecteur est proportionnelle à la variation du niveau, ce qui est converti en une indication de niveau.

Mesure du poids

La majorité des mesures du poids sont faites par des balances mécaniques à fléau ou par des jauges de contraintes. Le tableau 6 présente les caractéristiques et les coûts relatifs de ces deux types de dispositifs.

- Les *balances à fléau* fonctionnent sur le principe du levier, en amenant un poids inconnu et un poids de référence connu ou normalisé en équilibre sur les deux extrémités d'un levier. De faibles poids connus peuvent ainsi permettre de mesurer des poids supérieurs de plusieurs centaines de fois au leur. Le principe est le suivant: la force (le poids) exercée sur une extrémité du levier multipliée par la longueur de son bras de levier jusqu'au point d'équilibre, est égale à la force exercée sur l'autre extrémité multipliée de la même façon par la longueur de son bras de levier jusqu'au point d'équilibre.
- Les *jauges de contraintes* servent également à mesurer le poids. Une plate-forme peut être construite de sorte qu'elle soit supportée à chaque coin par une cheville métallique verticale ou par une barre métallique horizontale. La présence d'un poids sur la plate-forme engendre une contrainte sur la cheville ou la barre, et la mesure de cette contrainte produit un signal proportionnel au poids.

Mesure des grandeurs électriques

Terminologie

Les mesures électriques de base que sont les volts, ampères, watts et wattheures, sont des termes courants pour la plupart des gens, mais leur sens précis est souvent mal compris. Nous en donnerons donc une brève description. La consultation de traités d'électricité sera utile au lecteur qui désire des explications plus détaillées.

- Les volts (V) sont une mesure de la force électromotrice ou de différence de potentiel.
- Les ampères (A) sont une mesure de l'intensité du courant électrique.
- Les watts (W) sont le produit des volts par les ampères, et ils expriment une mesure de la puissance (c'est-à-dire du taux de travail accompli).

- Les wattheures (Wh) sont une mesure de la consommation d'électricité, et ces unités forment la base de facturation des compagnies d'électricité.
- Le facteur de puissance est une notion moins familière, mais très importante. La tension et le courant varient de façon cyclique dans un circuit de courant alternatif. Si ces variations de tension et de courant ne se présentent pas simultanément, il se produit ce qu'on appelle un déphasage, et la puissance utile est réduite. Plus le déphasage augmente, plus la puissance utile diminue. Les installations dont l'équipement provoque un trop grand déphasage voient leur facture d'électricité augmentée d'un supplément. Puisqu'il existe des moyens de corriger le facteur de puissance, on doit étudier s'ils seraient utiles.
- La mesure de la demande est généralement faite par des wattheuremètres. La demande est la puissance maximale consommée en tout instant. Les grandes installations sont facturées selon un tarif en deux tranches: la tranche *énergie* concernant la consommation totale (wattheures) enregistrée pendant la période de facturation, et la tranche *demande*, basée sur la demande (en watts) la plus forte qui fut enregistrée pendant la même période. Il est donc important de garder la pointe de demande la plus faible possible.

APPAREILS DE PESAGE
TABLEAU COMPARATIF DES CARACTÉRISTIQUES ET DES COÛTS RELATIFS

TABLEAU 6

TYPE	GAMME DE MESURE	COÛT RELATIF	PRÉCISION % INTERVALLE DE MESURE	UTILISABLE À L'EXTÉRIEUR	FIABILITÉ POUR LE PESAGE DYNAMIQUE
Balance mécanique à fléau	0 - 0,5 kg à 0 - 25 000 kg	M/É	0,05% à 0,1%	oui	passable
Jauges de contraintes	0 - 0,5 kg à 0 - 5 500 000 kg	M/É	0,1% à 1.0%	oui	excellente

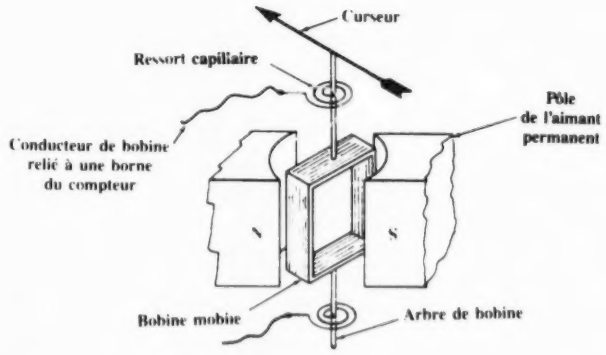
LÉGENDE

M — Coût moyen
É — Coût élevé

Types de compteurs d'électricité

La plupart des compteurs d'électricité installés de façon permanente son du type *à bobine mobile, à fer mobile ou électrodynamique*. Leurs principes de fonctionnement sont décrits ci-après.

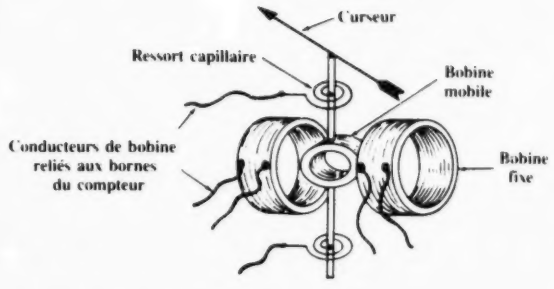
- Le *compteur d'électricité à bobine mobile* (figure 25) fonctionne sur le principe de l'attraction et de la répulsion magnétiques. Un courant qui traverse une bobine produit un champ magnétique. Si on monte cette bobine sur un arbre tournant entre les extrémités opposées d'un aimant permanent courbé en arc de cercle, et qu'on y applique un courant électrique, la bobine et l'arbre se mettent à tourner. Le champ magnétique créé dans la bobine se combine au champ des aimants pour créer un couple. Le curseur fixé à l'arbre présente une indication en volts ou en ampères selon l'installation du compteur.
- Le *compteur d'électricité à fer mobile* comporte deux fers cylindriques, dont l'un est monté à l'intérieur de l'autre (figure 26). Un fer est fixe et l'autre peut tourner librement, et l'ensemble est entouré d'une bobine. Le courant qui traverse la bobine produit un champ magnétique qui magnétise les deux fers. La répulsion des pôles identiques de ces deux aimants produit un couple qui imprime un mouvement de rotation au fer mobile.



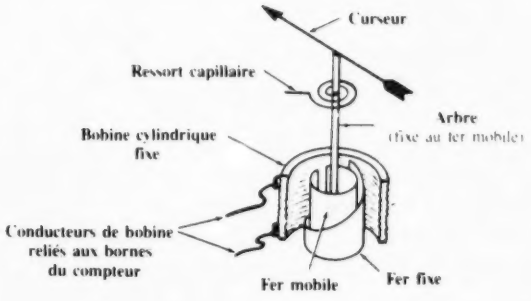
Compteur d'électricité à bobine mobile
Figure 25

- Le *compteur d'électricité électrodynamique* est une combinaison des types à bobine mobile et à fer mobile (figure 27). L'aimant et les fers sont remplacés par des bobines, de sorte qu'il y a une bobine mobile à l'intérieur ou entre des bobines fixes. Lorsque du courant circule dans les bobines, cela produit des champs magnétiques qui se combinent pour créer un couple. Le compteur indique des watts si une bobine perçoit des volts et l'autre, des ampères.

Un compteur inséré dans un circuit électrique constitue une résistance supplémentaire, en parallèle ou en série. Par conséquent, il faut prendre en considération la consommation de courant et la chute de tension qui en résultent. Il est impossible, dans le cadre du présent module, de passer en revue les multiples combinaisons de raccordements possibles. Aussi, il est sage de consulter un spécialiste pour choisir le compteur le plus approprié.



Compteur électrodynamique
Figure 27



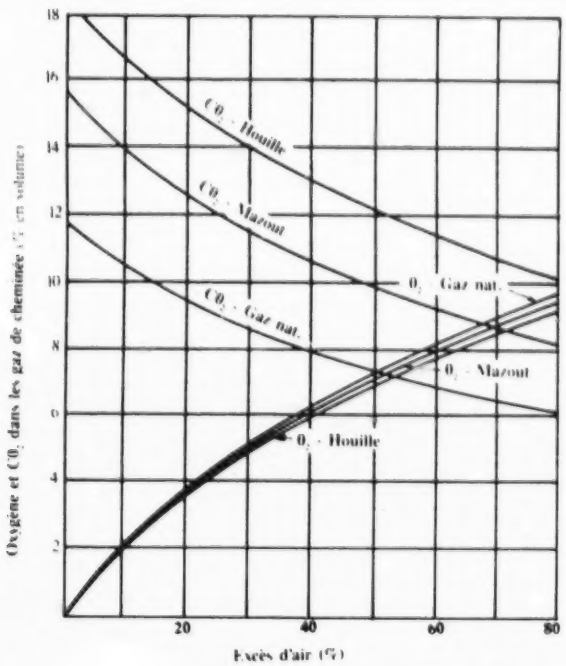
Compteur à fer mobile
Figure 26

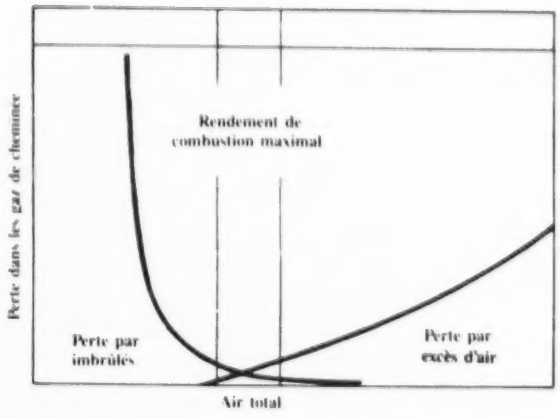
Analyse des gaz de cheminée

Pour déterminer le rendement d'un système de combustion alimenté par un combustible fossile, il est important de connaître la composition des gaz de combustion. Les trois gaz couramment analysés à cette fin sont l'oxygène (O_2), le gaz carbonique (CO_2), et le monoxyde de carbone (CO).

L'excès d'air intervenant dans un processus de combustion peut être calculé grâce à la mesure de l'O_2 ou du CO_2 (figure 28). En examinant les courbes, on voit que pour déterminer l'excès d'air à partir de l'indication du CO_2, le type de combustible est un facteur important, alors qu'à partir de l'indication de l'O_2, ce facteur est négligeable. Le CO étant un gaz combustible, sa présence révèle une combustion incomplète. La figure 29 montre combien les pertes thermiques augmentent rapidement lorsque l'excès d'air diminue au point qu'une grande quantité de CO se retrouve dans les gaz de cheminée. Certains analyseurs sont conçus pour mesurer l'O_2 et le CO, ce qui aide à repérer la zone du rendement de combustion maximal montrée dans la figure 29.

Les analyseurs de gaz coûtent cher et leur installation permanente n'est justifiée que pour les équipements de chauffage et processus produisant une puissance calorifique supérieure à 10 000 MJh. Cependant, pour les vérifications périodiques de petites installations, des appareils portatifs peuvent être achetés ou loués à un prix raisonnable. Certaines installations utilisent des analyseurs Orsat dans lesquels l'échantillon prélevé manuellement est soumis à l'absorption en série dans trois produits chimiques révélant les pourcentages de O_2, CO_2 et CO.





Zone de rendement de combustion maximale
Figure 29

Analyseurs d'oxygène

Les analyseurs d'oxygène fonctionnant par *détection électrochimique* sont couramment employés pour l'analyse des gaz de cheminée. L'échantillon à mesurer et le gaz de référence, généralement de l'air, sont séparés par un électrolyte solide composé d'oxyde de zirconium, à l'intérieur d'une chambre fermée. Par l'ionisation de l'échantillon et du gaz de référence portés à haute température, des concentrations d'oxygène différentes se présentent des deux côtés de la cloison d'oxyde de zirconium. Cette différence de concentration engendre une tension dans l'électrolyte, qui est mesurée et amplifiée pour produire un signal proportionnel à la teneur en O_2 de l'échantillon. Ce processus mesure l'O_2 d'après le poids net, c'est-à-dire que toute particule combustible contenue dans l'échantillon est brûlée par l'O_2. L'oxygène résiduel est mesuré en pourcentage par rapport à tous les composants du gaz, y compris la vapeur d'eau. Les gammes types vont de 0 à 5% et de 0 à 10% d'oxygène.

La *combustion catalytique* est une méthode ancienne de mesure de l'oxygène qui est encore très employée. La plupart des analyseurs portatifs fonctionnent d'après cette méthode. L'échantillon de gaz est mélangé avec un combustible et oxydé (brûlé) dans une chambre contenant une résistance revêtue d'un catalyseur d'oxydation. La quantité de chaleur produite par la combustion est proportionnelle à la quantité d'O_2 contenue dans l'échantillon et la résistance de l'élément est proportionnelle à la température, donc elle-même fonction de la chaleur produite par la combustion. La résistance peut alors être mesurée et employée pour produire une indication de la concentration en O_2. Normalement, un dispositif de lavage de l'échantillon est prévu en amont de l'analyseur pour nettoyer l'échantillon, et cela a également pour effet de condenser la vapeur d'eau, ce qui signifie que le pourcentage d'O_2 est mesuré par rapport à tous les constituants à l'exclusion de la vapeur d'eau.

Analyseurs de gaz carbonique et de monoxyde de carbone

L'aptitude d'un gaz à transmettre la chaleur est une propriété physique qui varie selon le type de gaz. Cette propriété de *conductivité thermique* peut être mesurée par l'effet refroidissant d'un gaz présenté sur un filament métallique chauffé. Le pouvoir refroidissant du gaz est proportionnel à sa concentration, il abaisse la température et modifie la résistance du filament. Les variations de résistance sont mesurées électriquement et amplifiées pour produire une indication proportionnelle à la concentration de CO_2 ou de CO.

Le CO_2 est le plus souvent mesuré d'après le principe d'*absorption de l'infrarouge*. Les rayons infrarouges sont projetés en faisceaux parallèles à travers deux chambres séparées contenant respectivement le gaz à analyser et le gaz de référence. Les deux chambres n'absorbent pas la même quantité de rayons infrarouges. Cette différence d'absorption est proportionnelle à la concentration du gaz mesuré, et elle est mesurée et amplifiée pour produire une indication proportionnelle à la teneur en CO_2. La teneur en CO peut également être obtenue de la même façon.

Le procédé par *combustion catalytique* expliqué précédemment peut, lui aussi, servir à mesurer le CO dans des concentrations aussi faibles que 0 à 250 parties par million, ou de 0 à 2%.

Systèmes d'échantillonnage des gaz de cheminée

L'endroit où l'on prélèvera l'échantillon doit être déterminé avec soin, afin d'être assuré d'obtenir des lectures représentatives. Le système d'échantillonnage du gaz le plus approprié varie selon les appareils d'analyse employés et la disposition des installations, ce qui doit être défini en consultation avec le fournisseur. Mais on doit être convaincu, au départ, de l'importance d'un système efficace d'échantillonnage. Voici quelques considérations importantes.

- On doit choisir judicieusement les endroits susceptibles de procurer des échantillons représentatifs. En prélevant les gaz à la sortie de la chaudière, on minimise le problème des infiltrations d'air qui affectent les résultats de l'analyse.
- On doit réduire le délai d'analyse en fixant le point d'échantillonnage à l'endroit où le temps de parcours des produits de combustion provenant du brûleur et le temps de transport de l'échantillon entre le point de prélèvement et l'analyseur, soient le plus courts possible.
- On doit veiller à ce que le dispositif d'échantillonnage ne soit pas obstrué par les impuretés des gaz de cheminée. Il faut également en prévoir l'entretien pour assurer le prélèvement efficace du gaz.

Étalonnage

Les appareils d'analyse des gaz ne sont pas aussi stables que la plupart des appareils de mesure de température et de pression: il faut donc vérifier leur étalonnage fréquemment. La fréquence des étalonnages dépend de l'importance de ces analyses pour l'efficacité de l'exploitation, ainsi que de la tendance de l'appareil à dériver. Cela peut signifier que la vérification d'étalonnage doit être faite chaque semaine ou, d'après l'expérience, qu'elle peut être prolongée sur une base mensuelle sans que la dérive devienne nuisible. Les instruments d'analyse des gaz sont étalonnés à l'aide de gaz d'essai en bouteilles ayant une composition certifiée semblable à celle des gaz mesurés. Un analyseur fréquemment étalonné ayant une bonne répétabilité fournit normalement une performance satisfaisante.

Contrôle

Dans le contexte du présent module, le contrôle consiste à analyser les données obtenues des instruments de mesure et à faire ensuite les démarches nécessaires. Il pourrait s'agir tout simplement de surveiller le tube de niveau d'un réservoir pour arrêter manuellement une pompe lorsque le réservoir est plein. Cependant, la plupart du temps, plusieurs données sont nécessaires à la prise de décision. Une grande variété d'appareils, tels qu'annonciateurs, indicateurs, enregistreurs, collecteurs de données, écrans cathodiques et ordinateurs, existent sur le marché pour faciliter le processus de contrôle. Le tableau 7 présente les caractéristiques et les coûts relatifs de divers appareils de contrôle.

Interrupteur

Souvent, il n'est pas nécessaire de connaître la valeur réelle d'un débit, d'une pression, d'une température ou d'une mesure électrique, mais seulement de savoir si elle est supérieure ou inférieure à une valeur déterminée. En pareil cas, il peut être suffisant d'employer un interrupteur réglé pour entrer en action à une valeur prédéterminée. Les interrupteurs peuvent actionner un voyant, une sonnerie d'alarme, un annonciateur ou un dispositif de commande de marche-arrêt.

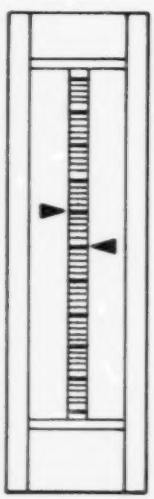
Les mécanismes qui actionnent les interrupteurs sont généralement les mêmes que ceux déjà décrits pour les indicateurs et les transmetteurs. En outre, un même mécanisme peut parfois actionner plusieurs dispositifs en même temps. Par exemple, un tube de Bourdon pourrait mesurer et indiquer la pression et, simultanément, positionner mécaniquement un interrupteur et un transmetteur.

Annonciateur

Un *annonciateur* est un système d'avertissement qui seconde l'activité de contrôle d'un processus. Les variables importantes sont captées de façon continue, mais portées à l'attention de l'opérateur seulement lorsque la variable mesurée dépasse les limites de consigne. Prenons l'exemple du contrôle d'une température. Un interrupteur de température est réglé pour actionner un contact lorsqu'un certain seuil est dépassé. Cela déclenche à distance un voyant clignotant et une sonnerie. Le voyant indique à l'opérateur qu'il y a dépassement de la température limite. L'opérateur réagit à l'alarme en arrêtant la sonnerie, et aussitôt le voyant cesse de clignoter, mais il reste allumé car il y a toujours dépassement de température. Lorsque la température redescend en dessous de la valeur de consigne, le voyant s'éteint automatiquement. Souvent, on peut disposer d'une batterie de voyants munis d'inscriptions identifiant leurs fonctions, de sorte que plusieurs variables peuvent être contrôlées en même temps par un seul opérateur, à partir d'un poste central.

Indicateur

Un indicateur est le moyen le plus simple et le moins coûteux d'afficher la valeur d'une variable de processus. Les indicateurs peuvent être directement raccordés aux capteurs, ou afficher à distance un signal pneumatique ou électronique provenant d'un transmetteur. Les indicateurs peuvent être de modèle circulaire ou vertical (figure 30).



Echelle verticale

Echelle circulaire

Indicateurs
Figure 30

Enregistreur

Un enregistreur est un appareil d'emploi courant pour consigner de façon continue la valeur d'une ou de plusieurs variables de processus (figure 31). Les diagrammes d'enregistrement sont conçus de façon à repérer dans le temps la variable mesurée. Les enregistreurs sont à inscription unique pour un processus à variable unique, ou à plusieurs plumes représentant des variables différentes. Dans ce dernier cas, des plumes de couleurs différentes sont employées pour chaque variable représentée.

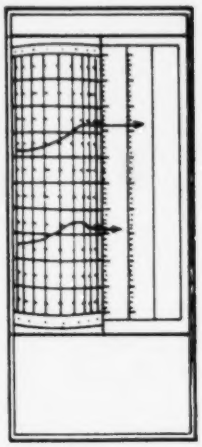


Diagramme en bande

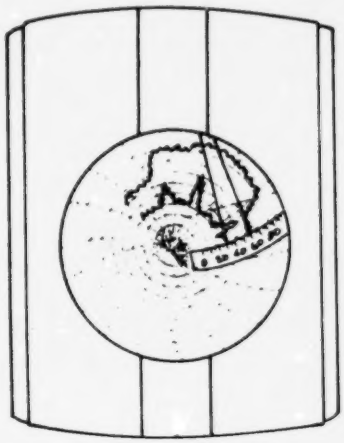


Diagramme circulaire

Enregistreurs
Figure 31

Les diagrammes d'enregistrement peuvent être circulaires ou en bande. Bien que les diagrammes circulaires consignent généralement une durée de 24 heures, ils peuvent aussi consigner une durée de sept jours. Normalement, un diagramme en bande sert aux enregistrements mensuels en continu.

Les enregistreurs peuvent être directement raccordés aux capteurs, ou recevoir à distance un signal provenant d'un transmetteur pneumatique ou électronique. La plupart des mesures peuvent être prises au moyen d'un enregistreur à mesurage direct, c'est-à-dire un enregistreur contenant lui-même le capteur de mesure. Cependant, l'emploi d'enregistreurs reliés au signal de sortie de transmetteurs se répand de plus en plus.

Totalisateur

Un totalisateur est un indicateur qui compte le nombre total d'unités de mesure perçues par un capteur. Par exemple, le compteur kilométrique d'une automobile est un totalisateur des kilomètres parcourus. Quant à l'indicateur de vitesse, qui indique le taux auquel les kilomètres sont parcourus, il est comparable à un indicateur de débit instantané.

Collecteur de données

Un collecteur de données prélève et emmagasine les données à une fréquence prédéterminée. C'est un instrument électronique, généralement à microprocesseur, qui est conçu pour contrôler un nombre relativement important de variables. Périodiquement, il effectue un cycle de prélèvements de tous les signaux d'entrée qui y sont raccordés. Pour chaque signal d'entrée qu'il perçoit, il lit la valeur correspondante et l'emmagasine. La valeur obtenue est imprimée sur un diagramme ou mise en mémoire sur ruban magnétique; elle peut même déclencher une alarme. En plus de la fonction d'enregistrement, de nombreux collecteurs de données sont capables de traiter les données. Ils peuvent calculer des totaux, faire des moyennes, choisir des maxima et des minima, multiplier et diviser par un nombre convenu ou par une autre entrée. Des modèles perfectionnés peuvent faire des opérations encore plus complexes.

Ordinateur

Un ordinateur est un appareil électronique capable d'exécuter de nombreuses fonctions. À partir d'un ensemble de protocoles ou de routines, l'ordinateur accepte des entrées, traite les données et produit des résultats systématiques. Il est généralement programmable, et il possède des appareils périphériques d'entrée sortie qui permettent les communications et constituent un interface entre le système informatique et l'opérateur.

Même si un collecteur de données est muni d'un microprocesseur, il ne peut jamais jouer le même rôle qu'un ordinateur. Leurs principales différences sont les suivantes:

- Un ordinateur a une plus grande capacité de traitement des données qu'un collecteur de données.
- Un ordinateur peut présenter les données sous plusieurs formes de rapports, alors qu'un collecteur de données ne présente généralement qu'un seul type de rapport.

- Un ordinateur possède une capacité de programmation qui est seulement limitée par la capacité de la mémoire, alors qu'un collecteur de données n'a qu'une capacité de programmation très limitée.
- Un ordinateur a une plus grande capacité de transmission qu'un collecteur de données.
- Un ordinateur a une plus grande capacité d'affichage qu'un collecteur de données.

L'écran cathodique est l'interface idéale entre le système informatique et l'opérateur pour permettre les opérations d'entrée sortie lorsqu'on n'a pas besoin d'obtenir des rapports imprimés; dans le cas contraire, on fait usage d'un terminal d'impression. Un opérateur peut facilement communiquer avec un ordinateur à l'aide d'un écran cathodique ou d'un terminal d'impression.

Certains écrans cathodiques sont spécifiquement conçus pour afficher des textes et des graphiques. L'affichage dynamique de graphiques est une caractéristique particulièrement utile pour la représentation des données.

APPAREILS DE CONTRÔLE
TABLEAU COMPARATIF DES CARACTÉRISTIQUES ET DES COÛTS RELATIFS

TABLEAU 7

TYPE D'APPAREIL	SERVICE	CARACTÉRISTIQUES	COÛT RELATF
Indicateur	Indication visuelle de la valeur instantanée de la variable mesurée	Diagramme circulaire ou en bande. L'affichage numérique est couramment employé.	Faible à moyen
Annonciateur	Signal visuel et/ou sonore indiquant que la variable mesurée est supérieure ou inférieure à un seuil	• mode d'alarme • retour à la normale • accusé de réception du signal sonore • arrêts dans l'ordre défini • essai de l'appareillage	Faible à moyen
Totalisateur	Indication visuelle du total d'unités de la variable mesurée est supérieure ou invérieure à un seuil	• cadran type compteur • réarmement manuel • réarmement automatique • commutation	Faible à moyen
Enregistreur	Produit un diagramme de la variable mesurée sur papier avec repères de temps	• diagramme circulaire • diagramme en bande • plumes multiples • base de temps variable	Faible à moyen
Collecteur de données	Produit un rapport sur papier ou support électronique d'entrées multiples — analogiques et/ou numériques	• entrées multiples • analogiques/numériques • emmagasine les données • traite les données • actionne un annonciateur	Faible à moyen
Ordinateur avec écran cathodique	Comme le collecteur de données	Comme le collecteur de données, plus: • exploration plus rapide • traitements plus nombreux • programmation • affichage plus développé	Élevé

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE

Les Possibilités de gestion de l'énergie désignent les cas où l'utilisation rationnelle de l'énergie peut avoir comme résultat de réduire les coûts d'exploitation. Dans ce chapitre, plusieurs possibilités typiques sont décrites sous les rubriques Possibilités de maintenance, Possibilités d'amélioration de coût modique et Possibilités de rénovation, avec des exemples concrets ou un bref exposé des économies d'énergie qui peuvent en découler. Si ce chapitre n'énumère pas d'une façon exhaustive toutes les possibilités qui existent réellement, il stimulera la vigilance du personnel de gestion, d'exploitation et de maintenance dans la recherche de toutes les possibilités existant dans leurs installations.

Il a été signalé antérieurement que les économies en énergie et en coûts d'exploitation ne découlent pas directement de l'emploi d'appareils de mesure et de contrôle. C'est l'application de ces appareils aux divers équipements et processus qui permet de réaliser des économies. Cela signifie qu'à l'étude des autres modules, l'emploi d'instruments susceptibles d'optimiser l'exploitation des équipements et processus doit toujours être présent à l'esprit. Dans la plupart des autres modules de cette série, un ensemble de feuilles de travail fournit une méthodologie pour les calculs détaillés indispensables à l'analyse des possibilités de gestion de l'énergie. Or, ces calculs font intervenir des données provenant d'instruments de mesure.

Ce chapitre est une synthèse des sujets déjà couverts et explique à l'aide d'exemples comment les instruments de mesure et de contrôle peuvent permettre de réaliser des économies d'énergie et de réduire les coûts d'exploitation. Nous avons omis les calculs détaillés qui exigent la compréhension du fonctionnement d'équipements et de systèmes spécialisés (par exemple, systèmes de conditionnement de l'air, chaudières, échangeurs de chaleur et compresseurs d'air). Puisque l'emploi judicieux des instruments de mesure et de contrôle peut procurer toutes sortes d'économies, chaque installation doit être évaluée à la recherche des avantages à retirer d'un tel appareillage.

Les trois catégories de possibilités de gestion de l'énergie seront maintenant discutées, suivies d'exemples concrets.

Possibilités de maintenance

Les possibilités de maintenance sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont exécutées de façon périodique, au moins une fois par année. En ce qui concerne l'appareillage de mesure et de contrôle, la maintenance comprend des activités telles que l'étalonnage périodique des appareils, l'identification des cas où le fonctionnement inefficace d'un processus pourrait être dû à l'insuffisance ou à l'imprécision des mesures, et la cueillette systématique, l'emmagasinage et l'exploitation des données. Les appareils de mesure peuvent aussi être employés dans certaines activités de maintenance en fournissant les données de base pour l'analyse.

1. Étalonnage

L'utilité des instruments de mesure dépend de la précision des données fournies. Il n'y a pas de meilleure façon d'augmenter la confiance dans les résultats de mesure que par l'étalonnage périodique des instruments. Les mécanismes des instruments sont délicats et nécessitent une maintenance continuelle. Le degré de maintenance nécessaire varie considérablement d'un instrument à l'autre. Par exemple, un simple manomètre peut n'exiger qu'une vérification annuelle pour assurer la clarté des repères et l'exactitude du niveau de liquide. Par contre, un analyseur en continu d'une grande sensibilité peut exiger une vérification générale journalière et un étalonnage hebdomadaire à l'aide d'un gaz témoin. Les instruments d'essai portatifs exigent normalement des vérifications plus fréquentes du fait qu'ils sont soumis à des manutentions plus brutales.

Les vérifications simples peuvent être confiées au personnel d'entretien général, ou bien les instruments peuvent être envoyés périodiquement aux ateliers de réparation. C'est également une pratique courante de souscrire un contrat d'entretien auprès d'un fournisseur d'appareillage ou d'une entreprise spécialisée. Lorsque les instruments sont nombreux, il peut être rentable d'investir dans l'acquisition d'un appareillage d'essai ou même de former un service de maintenance de l'appareillage de mesure.

Des registres d'étalonnage sont indispensables pour évaluer la performance des instruments. Ils peuvent révéler qu'il y aurait avantage à augmenter ou à réduire la fréquence d'étalonnage de certains instruments, ou même qu'il y aurait lieu d'en remplacer d'autres.

2. Registres

La tenue de bons registres est vitale pour garantir l'utilité des appareils de mesure et de contrôle. En premier lieu, les registres permettent de définir le modèle normal de fonctionnement des équipements et processus. En second lieu, ils permettent de découvrir rapidement l'existence d'un problème si les données provenant des appareils de mesure et de contrôle montrent que le fonctionnement s'écarte du modèle normalisé, ce qu'on ne peut pas faire sans disposer de registres antérieurs. Les variables importantes doivent être consignées manuellement dans des registres ou enregistrées automatiquement, et ces données doivent toujours être disponibles pour consultation.

Un écart subit par rapport au modèle normalisé de fonctionnement fait généralement ressortir une dérive de l'étalonnage, ou un dérangement survenu dans le processus. Dans l'un et l'autre cas, des mesures correctives rapides sont souhaitables.

Exemples concrets de maintenance

1. Étalonnage

Les conséquences d'une *dérive de l'étalonnage d'un instrument* sont illustrées par l'exemple suivant.

Dans bien des chaufferies, particulièrement si les charges de vapeur sont stables, le débit de l'air de combustion alimentant les chaudières est réglé manuellement d'après la teneur en oxygène mesurée dans les gaz de cheminée. Les analyseurs de modèle ancien ont tendance à dériver jusqu'à 10% en un mois. Si la gamme de mesure de l'analyseur d'oxygène est de 0 à 10%, une erreur de $\pm 10\%$ pourrait produire une lecture d'oxygène inférieure de 1% à la teneur réelle. Cela signifie que pour une chaudière réglée pour fonctionner à 3% d'oxygène, la teneur réelle serait portée à 4%. Or, on estime généralement qu'une différence de 1% d'oxygène a pour effet d'augmenter de 5% le volume d'air de combustion et de diminuer de 0,5% le rendement de la chaudière. Pour une chaudière de 25 000 kg/h fonctionnant à 75% de charge, une diminution de rendement de 0,5% coûte environ 2,26$ par heure, si le prix du gaz naturel est de 0,14$/m^3. À ce taux, on récupère très rapidement le coût d'une heure d'étalonnage.

2. Registres

Un problème qui se présente souvent dans les systèmes de conditionnement de l'air, c'est le blocage des volets d'entrée d'air dans la position ouverte. Cette anomalie peut rester insoupçonnée pendant longtemps du fait que le système de chauffage compense l'introduction supplémentaire d'air froid, et qu'il n'en résulte que peu de changement, s'il y en a, dans la température des locaux. Par contre, si la consommation du système de chauffage est mesurée, son augmentation sera évidente. Grâce aux registres, on peut comparer les taux de consommation actuels et antérieurs d'après des conditions ambiantes semblables, et conclure qu'il existe un problème. La cause peut alors être rapidement retrouvée et corrigée.

Possibilités d'amélioration de coût modique

Les *possibilités d'amélioration de coût modique sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont réalisées une seule fois et dont le coût n'est pas élevé.* Elles se distinguent donc des possibilités de maintenance, qui sont périodiques. La troisième et dernière catégorie concerne les *possibilités de rénovation* discutées plus loin, lesquelles englobent toutes les modifications trop coûteuses pour être admises dans la catégorie des améliorations de coût modique. La distinction entre les améliorations de coût modique et les rénovations dépend de la taille et de la nature de l'installation en cause, et cette distinction doit être définie par l'administration responsable.

1. Choix de la précision des instruments

La précision des instruments affecte la précision de mesure de l'ensemble d'un processus. À son tour, la précision de mesure d'un processus a une influence sur la qualité de son exploitation. Il faut donc viser comme objectif de sélectionner la précision des instruments de façon à obtenir l'exploitation optimale des processus sans pour autant payer le coût d'un degré de précision supérieur aux besoins réels.

2. Conception favorable au rendement énergétique

La bonne conception des systèmes de mesure comporte nécessairement la recherche du meilleur emploi de l'énergie. Le temps supplémentaire qu'exige la bonne évaluation de l'emploi de l'énergie devrait être investi avant de choisir et d'installer l'appareillage. Cependant, des possibilités de gestion de l'énergie existent à l'intérieur des systèmes déjà en place, et celles-là aussi doivent être évaluées.

3. Montage des instruments

On doit corriger tout montage défectueux d'un instrument de mesure afin de supprimer les inexactitudes qui peuvent en résulter. Ce genre de corrections améliorent souvent l'exploitation au point d'être rapidement rentables.

4. Filtres

Les filtres sont nombreux dans les systèmes de ventilation et dans les tuyauteries de processus, tout comme dans les circuits d'huile et d'eau. Tous les filtres ont un facteur en commun: ils s'encrassent à la longue. Or, l'encrassement augmente la perte de pression à travers le filtre, et cela impose au ventilateur ou à la pompe une charge supplémentaire par unité de volume.

Un capteur de pression différentielle peut servir à mesurer la perte de pression associée à un filtre. Ce dispositif peut également fournir une indication ou déclencher une alarme pour signaler la nécessité de nettoyer le filtre.

5. Contrôle de l'analyse des gaz de cheminée

Les analyseurs de gaz servent à déterminer l'excès d'air et le rendement d'équipements tels que les chaudières, ce qui permet de leur apporter les modifications aptes à réduire leur consommation d'énergie et les coûts correspondants.

6. Contrôle des systèmes de conditionnement de l'air

La bonne marche des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation des bâtiments, y compris les débits d'air frais extérieur, exige un contrôle continuel. Ce contrôle est nécessaire pour assurer le meilleur rendement possible en régime normal et pour détecter rapidement toute défaillance de l'équipement.

7. Détecteurs d'anomalies

Il existe de nombreux types de détecteurs peu coûteux, conçus pour signaler au personnel d'exploitation la présence d'anomalies de fonctionnement pouvant résulter d'une défaillance de l'équipement ou d'une erreur humaine.

Exemples concrets d'améliorations de coût modique

1. Choix de la précision des instruments

Supposons qu'une température de service doit être maintenue constante à 190°C. Pour chaque degré Celsius maintenu au-dessus de cette valeur, il se consomme un litre supplémentaire de mazout par heure. Cela représente 0,50$ par heure par °C, si le litre de mazout coûte 0,50$. On veut choisir entre deux thermomètres, présentant l'un et l'autre une précision de $\pm 2\%$ et de $\pm 1\%$ de la valeur indiquée. Ces deux appareils pourraient donc présenter des indications différentes de 1,9°C en présence d'une même température. Si la température de service était mesurée par le thermomètre d'une précision de $\pm 2\%$, le processus pourrait être maintenu à 1,9°C de plus qu'avec le thermomètre d'une précision de $\pm 1\%$. Or, cette précision accrue pourrait économiser 0,95$ par heure du fait de la consommation réduite de mazout. Si la différence de coût entre ces deux thermomètres est de 100$, il est rentable de choisir le plus précis puisque les économies d'énergie compenseraient son prix d'achat en moins d'une semaine. La même analyse entre une précision de $\pm 2\%$ et une autre de $\pm 0{,}5\%$ montre qu'on économiserait 1,42$ par heure, alors que le coût de l'amélioration est de 500$. Le gain de précision reste attrayant, même si la période de rentabilité est beaucoup plus longue.

L'importance de la précision des instruments est encore mieux démontrée par l'exemple suivant. Les cargos des Grands Lacs ont des systèmes de mesure du tirant d'eau (calaison) qui leur permet de naviguer le plus près possible du fond des écluses de la voie maritime. Un gain de précision de 1% dans cette mesure permet de naviguer 7,5 cm plus près du fond. Pour un cargo de 230 m sur 24 m transportant du blé, cette différence de 7,5 cm représente une cargaison accrue d'environ 220 tonnes. Cela économise indirectement l'énergie puisque la consommation moyenne d'énergie pour chaque tonne-kilomètre serait réduite.

2. Conception favorable au rendement énergétique

Les systèmes de pompage n'ont pas toujours été conçus pour optimiser l'utilisation de l'énergie. Prenons l'exemple d'une pompe à eau sélectionnée pour débiter 319 L/s à une hauteur manométrique de 134 m. La pression mesurée en divers points du circuit démontra que la hauteur manométrique pouvait être réduite de 12 m. Cela réduirait la pression différentielle au robinet de réglage tout en la maintenant suffisante pour que la régulation reste efficace. On pourrait ainsi réduire de 7 kW la puissance de la pompe par une modification de la turbine qui coûterait 500$. Puisque la pompe fonctionne 6 500 heures par année et que l'électricité coûte 0,05$ par kWh, les économies réalisables s'établissent comme suit:

$$\text{Économies annuelles (\%)} = 7 \text{ kW} \times 6\,500 \text{ h/an} \times 0{,}05 \text{ \$/kWh}$$

$$= 2\,275 \text{ \$}$$

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{500 \text{ \$}}{2\,275 \text{ \$}}$$

$$= 0{,}22 \text{ an (3 mois)}$$

En outre, le même circuit était muni d'un dispositif de mesure du débit où une importante perte de charge (non récupérée) se produisait à la traversée de la plaque à orifice. Il fut calculé que la perte de charge pouvait être réduite de 2,5 m en régime normal de débit, en installant une nouvelle plaque à orifice et en recalibrant le transmetteur de débit. Cette nouvelle modification permettait de réduire davantage le diamètre de turbine de la pompe et de réduire sa consommation électrique de 1,5 kW de plus. Signalons que la turbine serait modifiée une seule fois, au coût déjà indiqué de 500$. Le coût de remplacement de la plaque à orifice et de recalibrage du transmetteur étant de 600$, la dépense totale s'élevait à 1 100$. Les économies globales se calculent ainsi:

$$\text{Économies annuelles (\$)} = 8{,}5 \text{ kW} \times 6\,500 \text{ h/an} \times 0{,}05 \text{ \$/kWh}$$

$$= 2\,762 \text{ \$}$$

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{1\,100 \text{ \$}}{2\,762 \text{ \$}}$$

$$= 0{,}4 \text{ an (5 mois)}$$

Si la pompe n'avait pas été d'une capacité excessive à l'origine, la period de rentabilité de la seule modification du système de mesure de débit aurait été encore intéressante, comme le démontre l'équation suivante:

$$\text{Économies annuelles (\$)} = 1{,}5 \text{ kW} \times 6\,500 \text{ h/an} \times 0{,}05 \text{ \$/kWh}$$

$$= 493 \text{ \$}$$

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{1\,100 \text{ \$}}{493 \text{ \$}}$$

$$= 2{,}2 \text{ ans}$$

3. Montage des instruments

Les cas sont nombreux d'instruments de mesure dont le montage défectueux nuit à l'exploitation efficace des équipements et processus. Pour ces cas, il n'est pas essentiel de calculer les périodes de rentabilité, mais on peut donner des exemples de cas susceptibles de nuire au fonctionnement et de réduire le rendement énergétique.

- Un thermomètre installé derrière une chicane interne d'un désaérateur indique une température inférieure de 8,5°C à la température réelle de l'eau de 110°C.
- À cause du phénomène de stratification, un thermocouple posé à 15 cm de la paroi dans une gaine de 1 mètre de largeur indique une température inférieure de 15°C à la température moyenne de 160°C dans la gaine.

- Les bavures de perçage laissées sur la paroi intérieure d'une tuyauterie aux prises de pression d'une plaque à orifice provoquent des erreurs variant de 5 à 10%, selon le débit.
- Une plaque à orifice pour la vapeur conçue pour une pression différentielle de 862,5 kPa (eff.) qui fonctionne sous 690 kPa produit des résultats de mesure supérieurs de 9% au débit réel.

Il est donc indispensable d'examiner le montage des instruments lorsqu'ils présentent des écarts de mesure qu'on ne peut pas attribuer à une simple dérive de leur étalonnage.

4. Filtres

Dans un système d'amenée d'air de ventilation, la pression différentielle dans un filtre à air varie selon l'état du filtre. Une augmentation de 125 Pa à travers le filtre augmente de 10% la charge imposée au moteur du ventilateur. Cette augmentation de charge demandée à un moteur de 18,5 kW fait augmenter ses coûts d'exploitation de 1,80$ par jour, si chaque kWh coûte 0,05$. Un indicateur de pression différentielle ou un interrupteur de pression différentielle jumelé à une alarme pourrait signaler au personnel que le moment est venu de remplacer le filtre.

5. Contrôle de l'analyse des gaz de cheminée

Un analyseur d'oxygène peut servir de guide pour régler manuellement les débits de combustible et d'air d'alimentation d'une chaudière pour améliorer l'excès d'air. Les figures 28 et 29 du chapitre sur les notions de base font voir la relation qui existe entre l'excès d'air et les déperditions calorifiques de la chaudière. L'effet de la réduction de l'excès d'air sur l'amélioration du rendement de la chaudière dépend de la température des gaz de cheminée, mais les économies à en tirer peuvent être considérables.

Cet exemple est bien différent de l'exemple de chaudière qu'on a vu précédemment, mais il démontre qu'on peut élargir le domaine d'emploi des analyseurs de gaz. Dans bien des installations d'entreposage, les camions sont chargés à des quais intérieurs. L'accumulation de polluants provenant des moteurs à combustion interne est empêchée par une ventilation continue. Or, évacuer continuellement de l'air chauffé à l'extérieur peut coûter très cher. L'emploi d'un système mesurant le monoxyde de carbone permet d'arrêter la ventilation lorsque les concentrations sont inférieures aux limites acceptables.

6. Contrôle des systèmes de conditionnement de l'air

Les problèmes des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation ne sont pas exclusifs aux bâtiments de grands complexes. Les défaillances sont courantes dans les systèmes de toute taille qui contiennent des serpentins de chauffage et de refroidissement. Dans les installations où un personnel d'entretien peut inspecter l'équipement de façon périodique, ces problèmes peuvent être détectés par la mesure des variables importantes de température, de pression et de débit. L'installation permanente d'instruments de mesure à des endroits stratégiques serait l'idéal, mais cela coûte cher et n'est pas indispensable. Les gaines d'air peuvent être munies de prises d'essai assez grandes pour recevoir un manomètre, un thermomètre ou un tube de Pitot. Le personnel d'entretien peut alors faire périodiquement les vérifications aptes à révéler des lacunes.

7. Détecteurs d'anomalies

La liste suivante fournit des exemples de consommations inutiles de l'énergie.

- La porte d'un quai de chargement qui reste ouverte longtemps après le départ du camion.
- Le remplissage d'un réservoir qui se poursuit alors que le trop-plein se déverse à l'égout.

Le coût de ce type de négligence peut être énorme. Il suffirait d'installer sur la porte un interrupteur muni d'une minuterie et sur le réservoir un interrupteur de haut niveau relié à un avertisseur signalant chaque fois au personnel de rectifier la situation.

Possibilités de rénovation

Les *possibilités de rénovation sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont réalisées une seule fois et dont le coût est important*. Un appareillage de mesure et de contrôle peut être appliqué à la plupart des types d'équipements et de processus. Les exemples qui suivent montrent divers cas de rénovation où l'emploi d'appareils de mesure et de contrôle permet d'économiser l'énergie et de réduire les coûts. Cependant, il est essentiel que chaque installation soit examinée à la recherche de ses propres possibilités.

1. Mesure

Les instruments de mesure fournissent les données permettant d'assurer le fonctionnement efficace d'un système, et d'analyser son rendement dans le temps. Ces raisons justifient les dépenses, mais on peut profiter d'avantages supplémentaires en les employant pour déceler des anomalies de fonctionnement dues à une défaillance d'équipement ou à une erreur humaine. Sans résultats de mesure, un défaut peut rester insoupçonné pendant longtemps.

2. Demande électrique de pointe

Les résultats de mesure peuvent être contrôlés à l'aide d'un système d'enregistrement des données. Généralement, un système de mesurage à distance transmet les résultats à un point central chaque jour ou à chaque quart de travail pour qu'ils soient enregistrés et imprimés. Le système peut également être doté d'un dispositif d'alarme signalant à l'opérateur que des variables mesurées dépassent certaines limites. Ce type de système peut surveiller la consommation totale en kW d'une installation, pour signaler qu'un seuil défini est sur le point d'être atteint. L'opérateur peut alors déterminer les mesures nécessaires pour réduire la charge de pointe et maintenir cette fraction de la facture d'électricité au minimum.

3. Optimisation de l'exploitation des chaudières

Il est vital, maintenant que l'énergie coûte très cher, de s'assurer que tous les équipements présentent un bon rendement et reçoivent une maintenance adéquate. Cela est particulièrement vrai dans le cas des équipements de combustion en raison des grandes quantités d'énergie qu'ils consomment.

Le contrôle précis du rendement d'une chaudière exige la collecte d'un nombre considérable de données et le calcul d'une série d'équations. Sinon, toute déviation par rapport aux normes de fonctionnement peut rester insoupçonnée pendant de longues périodes de temps, même si les méthodes d'exploitation, de maintenance et de contrôle sont d'une grande qualité. Souvent, de telles situations existent du fait que le personnel responsable de la collecte des données et du contrôle de la performance manque de temps à cause d'horaires trop chargés.

Avec l'avènement de la microélectronique, et grâce au coût réduit des systèmes d'automatisation de la collecte des données et du calcul des rendements, on peut désormais se procurer des systèmes d'optimisation de l'exploitation des chaudières à un prix économiquement justifiable. Ces systèmes fournissent au personnel de gestion et d'exploitation les profils de rendement des chaudières individuelles et de la chaufferie entière. Ces données permettent de reconnaître rapidement toute détérioration du rendement et de prendre les mesures correctives nécessaires pour maintenir la performance optimale.

4. Correction des défauts de conception

Il arrive qu'on doive corriger des installations inadéquates de par leur conception même, si l'on veut en obtenir le résultat ou le rendement attendu. Il ne faut pas croire d'emblée que la conception est bonne du seul fait que l'installation a été exploitée pendant un certain temps.

Exemples concrets de rénovations

1. Mesure

La *mesure de l'énergie thermique livrée à chaque bâtiment d'un vaste complexe* représente une possibilité très intéressante de gestion de l'énergie, comme le démontre l'exemple suivant. Une analyse effectuée pendant un mois sur trois immeubles d'un campus universitaire révéla que dans un immeuble, deux problèmes distincts existaient dans le contrôle des systèmes de conditionnement de l'air. Dans le premier cas, de la glace avait bloqué les volets d'entrée de l'air extérieur en les laissant ouverts aux trois quarts, et dans le second cas, le dispositif de commande d'un volet mixte faisait défaut. Dans chaque cas, la quantité d'air extérieur introduit dans le système dépassait considérablement les volumes nécessaires. Il en résulta que la consommation de vapeur passa de 20 000 à 68 000 kg/jour. Cet accroissement de 48 000 kg/jour dans la production de vapeur représentait un coût journalier de combustible d'environ 500$. Des débitmètres installés sur les conduites d'alimentation de vapeur ou de retour du condensat dans chaque immeuble, et raccordés à un système central de contrôle, auraient permis de constater sur-le-champ cette hausse subite du débit. Vu l'importance du campus (36 immeubles et 144 systèmes distincts de chauffage), une estimation conservatrice de l'économie annuelle à réaliser pour tous les bâtiments se chiffre à 50 000$.

L'exemple suivant d'une usine de traitement de produits alimentaires démontre encore l'importance du mesurage. Cette usine de traitement d'huile végétale produit plusieurs types d'huile et plusieurs grades différents en mélangeant différentes huiles de base. Le processus exige des opérations de comptage de lots et de répartition pour l'acheminement et le prélèvement des diverses huiles dans de nombreux réservoirs, et il exige un contrôle très attentif des quantités de mélange et des quantités en stock. Des systèmes de contrôle des pertes, comportant des instruments de mesure du débit, des balances et des collecteurs de données, furent mis au point pour assurer un contrôle adéquat. Bien que cet exemple ne soit pas directement relié à la consommation de l'énergie, il est évident que des pertes ou du gaspillage de produit constituent, en fin de compte, un gaspillage d'énergie.

2. Demande électrique de pointe

Dans un campus universitaire, on dénombra 250 moteurs de ventilateurs dans les systèmes de conditionnement de l'air. Une analyse du profil de charge électrique du complexe et du courant consommé par les moteurs de ventilateurs mit en évidence une excellente possibilité de réduire la demande électrique de pointe. En effet, il apparut que l'arrêt temporaire de certains groupes de ventilateurs n'aurait pas d'effets sensibles sur le confort, mais qu'ainsi, on réduirait de 200 kW la demande de pointe. L'installation de compteurs d'électricité dans chaque bâtiment, et leur raccordement à un poste automatique de contrôle central, allait permettre au personnel d'exploitation d'alléger la consommation de courant lorsque c'était possible. Cette initiative devait permettre d'économiser 25 000$ par année.

3. Optimisation de l'exploitation des chaudières

Un ministère fédéral responsable d'un certain nombre de chaufferies de vapeur par tout le Canada a mis au point des programmes informatiques pour exécuter les tâches suivantes:

- Calculer le rendement d'une chaudière à l'aide de la méthode directe (débit de chaleur sortant/débit de chaleur entrant).
- Calculer le rendement d'une chaudière à l'aide de la méthode indirecte (bilan thermique).
- Emmagasiner en mémoire les courbes représentant le fonctionnement idéal de chaque chaudière à tous les régimes de chauffe et pour tous les combustibles.
- Comparer les rendements calculés de chaque chaudière avec la courbe représentant son fonctionnement idéal.
- Produire un rapport hebdomadaire sur le rendement de chaque chaudière, accompagné de comparaisons entre les niveaux réels et les niveaux cibles.

Les données fournies à l'ordinateur pour ces calculs et rapports furent rassemblées par le personnel d'exploitation et introduites *manuellement* dans l'ordinateur. Cette information produisit des rapports hebdomadaires qui aidèrent le personnel d'exploitation à identifier toute baisse de performance des chaudières et des instruments de mesure. Cela eut également pour effet de sensibiliser le personnel à l'importance que présente la précision des paramètres d'exploitation. Ce programme fut implanté dans six chaufferies contenant 18 chaudières et engendra une économie évaluée à 4% de la dépense totale en combustible.

Un exemple plus sophistiqué d'une possibilité d'optimiser le rendement des chaudières fut réalisé à la chaufferie centrale d'une université. Un micro-ordinateur recevait *directement* les signaux représentant les variables des chaudières nécessaires pour le calcul du rendement. Il s'agissait d'une chaufferie de quatre chaudières d'une capacité installée de 160 000 kgh produisant une charge annuelle moyenne de 300 millions de kg de vapeur. En plus des rapports décrits dans l'exemple précédent, ce système identifie la combinaison de chaudières qui devraient fonctionner en ligne selon la demande. Si le rendement d'une chaudière diminue ou que la combinaison de chaudières n'est plus la meilleure, des alarmes préviennent le personnel. L'économie de combustible ainsi réalisée est évaluée à 1,5% de la dépense annuelle à ce titre, soit 50 000$ par année.

4. Correction des défauts de conception

Même dans les cas où un investissement considérable est nécessaire pour corriger un défaut de conception, l'analyse peut démontrer la rentabilité du projet. Dans une chaudière à combustion au bois, la production de vapeur était nettement inférieure à la valeur nominale prévue. Le problème fut identifié comme provenant de l'insuffisance d'air de combustion, mais la cause aurait pu être liée à plusieurs facteurs tels que des sections de passage réduites dans les tubes de la chaudière, une cheminée inadéquate ou des ventilateurs de capacité insuffisante. Une appareillage portatif d'essai fut employé pour produire le profil des circuits d'air de combustion et de gaz de cheminée. Des mesures de débit, de température et de pression furent prises en divers points. L'analyse détaillée des données recueillies démontra que la perte de charge dans le dépoussiéreur était excessive du fait que l'appareil avait été incorrectement dimensionné. Le dépoussiéreur fut donc enlevé et remplacé par un autre de capacité appropriée.

ANNEXES

A Glossaire
B Conversions courrantes
C Liste de contrôle

Glossaire

Le Module 15 — *Mesures et contrôles* et le Module 16 — *La régulation automatique* étant étroitement liés, ils doivent être utilisés ensemble pour l'étude des possibilités de la gestion de l'énergie. Le présent glossaire s'applique à ces deux modules.

Action de régulation — Mode de régulation désignant la manière dont la grandeur d'entrée affecte la grandeur de sortie.

Action dérivée — Action du régulateur caractérisée par le fait que la grandeur de sortie est proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart de réglage. L'action dérivée sert à éliminer les problèmes liés aux temps de réponse de l'organe de mesure.

Action intégrale — Action du régulateur caractérisée par le fait que la grandeur de sortie varie avec une vitesse proportionnelle à l'écart. L'action intégrale sert à éliminer les écarts entre le point de consigne et la grandeur mesurée.

Action proportionnelle — Action du régulateur caractérisée par le fait que la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la variation de la grandeur contrôlée.

Action proportionnelle et dérivée (P.D.) — Action du régulateur caractérisée par le fait que la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la combinaison linéaire de la variation de la grandeur contrôlée et de la vitesse de variation de l'écart de réglage.

Action proportionnelle et intégrale (P.I.) — Action du régulateur caractérisée par le fait que la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la combinaison linéaire de la variation de la grandeur contrôlée et de la vitesse proportionnelle à l'écart.

Action proportionnelle, intégrale et dérivée (P.I.D.) — Action du régulateur caractérisée par le fait que la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la combinaison linéaire de la variation de la grandeur contrôlée, de la vitesse proportionnelle à l'écart, et de la vitesse de variation de l'écart de réglage.

Alarme — Signal sonore ou visuel révélant l'existence d'une condition anormale.

Analyse au passage — Inspection visuelle d'une installation pour étudier la consommation de l'énergie.

Analyse des gaz de cheminée — Mesure des composants des produits de combustion, habituellement exprimée par le pourcentage en volume d'oxygène (O_2), de monoxyde de carbone (CO) ou de gaz carbonique (CO_2).

Analyse de diagnostic — Analyse d'une possibilité d'économie d'énergie pouvant comporter l'évaluation du fonctionnement du processus, le calcul des économies possibles et l'évaluation des frais d'immobilisation et des coûts d'exploitation afin de calculer la rentabilité de l'investissement.

Appareil de mesure — Appareil qui évalue la grandeur d'une quantité ou d'un état.

Appareil enregistreur — Appareil qui enregistre les diverses grandeurs de la grandeur mesurée.

Appareil indicateur — Appareil qui indique la valeur actuelle de la grandeur mesurée.

Appareillage — Ensemble des appareils et instruments assurant la mesure et le contrôle direct du processus.

Autorégulation — Propriété d'un processus ou d'une machine d'atteindre un régime stable après une perturbation, sans l'intervention d'un régulateur.

Avertisseur — Dispositif destiné à donner des signaux sonores et/ou visuels pour informer le personnel d'exploitation de l'existence d'une condition anormale.

Bande proportionnelle — Variation nécessaire de la grandeur à régler pour que le régulateur effectue toute sa course. Inverse du gain proportionnel.

Boucle fermée (boucle à asservissement) — Parcours d'un signal incluant une chaîne d'action, une chaîne de réaction et un point de sommation, le tout formant un circuit fermé.

Collecteur de données — Appareil électronique d'enregistrement des données qui assure le stockage et le traitement des données.

Commutateur automatique-manuel — Dispositif permettant à l'opérateur de choisir un signal d'entrée automatique ou manuel pour un élément de réglage final. Le signal automatique est généralement un signal de sortie de régulateur, alors qu'un signal manuel est un signal de sortie d'un appareil fonctionnant à la main.

Comptabilisation de l'énergie — Activité consistant à recueillir avec précision toute l'information se rapportant à la production et à la consommation de l'énergie, et à en faire l'analyse aux fins d'établissement de rapports et de contrôle.

Conditions de service — Conditions de marche auxquelles un dispositif est assujetti (excluant la grandeur qu'il mesure).

Consommation d'air — Taux maximal d'air consommé par un dispositif à l'intérieur de sa gamme de service en présence des signaux reçus en régime établi.

Contrôle — Observation de l'état d'un processus ou d'une installation à l'aide d'appareillage dit de contrôle. Dans le présent module, le contrôle englobe également l'analyse des données recueillies par l'appareillage de contrôle.

Course de l'indicateur — Longueur de l'échelle graduée d'un indicateur.

Débitmètre — Dispositif qui mesure le débit ou la quantité d'un fluide circulant dans un conduit ouvert ou fermé.

Dérive — Variation indésirable progressive de la grandeur de sortie.

Écart permanent — Différence entre le point de consigne et la grandeur contrôlée en régime établi.

Écran cathodique — Appareil de visualisation qui permet un dialogue interactif entre l'opérateur et l'ordinateur ou le collecteur de données.

Élément de réglage final — Élément de la chaîne de régulation qui agit directement sur la grandeur asservie.

Élément primaire — Élément chargé de convertir la grandeur mesurée en une autre grandeur, utilisable par le transmetteur.

Élément sensible — Élément qui réagit directement à la grandeur mesurée.

Énergie — Grandeur caractérisant l'aptitude d'un système physique à fournir un travail. L'énergie existe sous différentes formes transformables: énergie thermique (chaleur), mécanique (travail), électrique et chimique. L'énergie est mesurée en kilowattheures (kWh) ou en mégajoules (MJ).

Énergie gaspillée — Énergie dissipée sans avoir été pleinement utilisée.

Étalon — Unité de mesure normalisée qui permet de comparer les grandeurs de façon précise.

Étalonner — Régler un appareil de mesure pour que ses indications de sortie correspondent à la série déterminée de valeurs de la grandeur à mesurer.

Fiabilité — Aptitude d'un appareil à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné.

Gamme de mesure — Zone définie par les valeurs limites des portées minimale et maximale.

Grandeur asservie — Grandeur sur laquelle agit le régulateur pour maintenir la grandeur contrôlée à la valeur prescrite.

Grandeur contrôlée — Dans une boucle de régulation, grandeur physique qui doit être maintenue à la valeur désirée.

Grandeur mesurée — Grandeur, propriété ou état mesuré.

Intervalle de mesure — Différence algébrique entre les portées minimale et maximale.

Limites de fonctionnement — Ensemble des conditions de service auxquelles un dispositif peut être assujetti sans que ses caractéristiques de fonctionnement soient affectées de façon permanente.

Linéarité — Le degré de rapprochement d'une course à une ligne droite.

Mesure d'un processus — Acquisition des données permettant de connaître la grandeur des quantités intervenant dans un processus.

Micro-ordinateur — Ordinateur à circuit ou composant unique qui comprend un microprocesseur comme unité centrale de traitement, une mémoire et des circuits d'entrée/sortie intégrés.

Microprocesseur — Circuit ou dispositif microélectrique qui assure les fonctions de traitement des données d'un ordinateur.

Mise au point — Réglage des régulateurs et observation de la réaction du processus en vue d'obtenir un fonctionnement qui réagit de façon acceptable aux perturbations du processus.

Ordinateur — Appareil électronique qui reçoit des entrées, en effectue le traitement et produit des sorties. Il comprend une unité centrale de traitement, une mémoire et des circuits d'entrée/sortie.

Période d'échantillonnage — Intervalle de temps entre les observations effectuées par un système à échantillonnage périodique.

Perturbation — Modification intervenant dans un processus ayant pour effet d'éloigner la grandeur contrôlée de son point de consigne.

Plage d'insensibilité — Différence de deux valeurs limites d'une grandeur d'entrée entre lesquelles une variation de celle-ci ne provoque pas une variation significative de la grandeur de sortie.

Point de consigne — Variable d'entrée qui règle la valeur prescrite de la grandeur contrôlée.

Portée maximale — Valeur maximale de la grandeur d'un instrument de mesure.

Portée minimale — Valeur minimale de la grandeur d'un instrument de mesure.

Possibilités d'amélioration de coût modique — Initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois, et dont le coût n'est pas élevé.

Possibilités de maintenance — Initiatives de gestion de l'énergie exécutées de façon périodique, une fois par année.

Possibilités de rénovation — Initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois, et dont le coût est important.

Poste de contrôle central — Bloc d'appareils ou groupement de blocs d'appareil qui assure les fonctions de mesure, de régulation et/ou de surveillance d'un processus.

Pouvoir calorifique — Énergie totale contenue dans un combustible, exprimée en mégajoules (MJ).

Précision de mesure — Différence entre la valeur affichée et la valeur mesurée.

Précision nominale — Pour un instrument de mesure, valeur qui définit l'erreur maximale qu'un mesurage peut présenter dans les conditions d'emploi déterminées. La précision nominale tient compte des effets combinés des erreurs de conformité, d'hystérésis, de plage d'insensibilité et de répétabilité. La précision est exprimée d'après la grandeur mesurée, soit en pourcentage de la gamme de mesure, en pourcentage de la portée maximale ou en pourcentage de la valeur indiquée.

Pression absolue — Toute pression dont la base de mesure est le vide absolu, exprimée en kPa (abs.).

Pression de rupture — Pression à laquelle un dispositif éclate (déterminée par un essai).

Pression de service — Pression à laquelle un dispositif est soumis dans des conditions normales de fonctionnement.

Pression différentielle — Différence de pression entre deux points.

Pression dynamique — Pression mesurée dans le sens du débit moins la pression statique.

Pression effective — Toute pression dont la base de mesure est la pression atmosphérique, exprimée en kPa (eff.). À noter que kPa (eff.) + pression atmosphérique = kPa (abs).

Pression maximale de service — Pression totale maximale admissible à tout moment dans un dispositif en marche à une température prescrite.

Pression statique — Pression exercée dans toutes les directions par un fluide au repos. Lorsqu'il s'agit d'un fluide en mouvement, la pression statique est mesurée dans un sens perpendiculaire au débit.

Processus — Transformation physique ou chimique de la matière ou conversion de l'énergie.

Régime établi — État dans lequel une grandeur mesurée ou un instrument ne change pas avec le temps.

Réglage de la gamme de mesure — Dispositif intégré dans un instrument permettant de modifier la forme de la courbe d'entrée-sortie.

Réglage du zéro — Fonction d'un instrument qui assure le déplacement parallèle de la courbe d'entrée-sortie.

Régulateur — Appareil qui contrôle les variations de la grandeur contrôlé.

Régulateur à action inverse — Régulateur caractérisé par le fait que la diminution de la grandeur du signal de sortie est proportionnelle à l'augmentation de la grandeur d'entrée (grandeur mesurée).

Régulateur à action directe — Régulateur caractérisé par le fait que l'augmentation de la grandeur du signal de sortie est proportionnelle à celle de la grandeur d'entrée (grandeur mesurée).

Régulateur autonome — Régulateur qui tire directement du système asservi l'énergie servant au fonctionnement de l'élément de réglage final.

Régulateur programmable — Dispositif électronique qui assure la régulation selon un logiciel en mémoire et la réaction des dispositifs d'entrée et de sortie.

Régulateur programmé — Régulateur qui maintient ou modifie automatiquement le point de consigne selon un programme de marche prédéterminé.

Régulation à asservissement — Mode de régulation qui compare la grandeur mesurée au point de consigne et qui émet un signal d'erreur pour réduire l'écart entre les deux valeurs.

Régulation à éléments multiples — Mode de régulation qui agit sur plus d'une grandeur de processus pour maintenir la grandeur contrôlée.

Régulation automatique — Tout mode de régulation ne nécessitant pas d'intervention humaine.

Régulation de processus — Régulation ou traitement des grandeurs en vue d'obtenir efficacement un produit d'une qualité définie.

Régulation de surveillance — Mode de régulation selon laquelle les boucles de régulation fonctionnent indépendamment selon des actions correctives intermittentes.

Régulation en cascade — Mode de régulation selon laquelle la grandeur de sortie d'un régulateur devient le point de consigne d'un autre régulateur.

Régulation numérique — Mode de régulation assuré par un calculateur numérique qui envoie le signal directement à l'élément de réglage final.

Régulation optimale — Mode de régulation qui recherche et maintient automatiquement la valeur la plus avantageuse d'une grandeur prescrite, plutôt que de la maintenir à une valeur fixe.

Régulation par anticipation — Mode de régulation selon laquelle les données relatives à une ou plusieurs conditions susceptibles de perturber la grandeur contrôlée sont converties, en dehors de toute boucle à asservissement, en une mesure corrective minimisant l'écart de cette grandeur.

Régulation par tout ou rien — Mode de régulation selon laquelle la grandeur de sortie du régulateur demeure à une valeur maximale ou minimale jusqu'à ce que la grandeur contrôlée franchisse un seuil déterminé. Le régulateur inverse alors son signal de sortie.

Régulation proportionnelle — Tout mode de régulation selon lequel les grandeurs asservies peuvent être réglées à n'importe quelle position à l'intérieur de la gamme de régulation pour maintenir la grandeur contrôlée au point de consigne.

Rendement énergétique — Mesure de l'efficacité de l'emploi de l'énergie exprimée en quantité d'énergie par unité de production.

Répétabilité — Étroitesse de l'accord entre les résultats de mesure successifs de la grandeur de sortie pour la même valeur de la grandeur d'entrée, dans les mêmes conditions de service, par le même observateur.

Réponse dynamique — Comportement de la grandeur de sortie relativement à la grandeur d'entrée par rapport au temps.

Sécurité intrinsèque — Un appareil ou un réseau dit «à sécurité intrinsèque» ne peut, en aucune condition (normale ou anormale), libérer suffisamment d'énergie électrique ou thermique pour provoquer l'allumage d'une atmosphère dangereuse.

Signal analogique — Signal représentant une grandeur qui peut être observée et représentée de façon continue.

Signal d'erreur — Signal indiquant l'écart entre le point de consigne et la grandeur contrôlée.

Signal de sortie — Signal produit par un dispositif.

Signal numérique — Représentation de l'information par un ensemble de valeurs discrètes conformément à une convention. Ces valeurs sont représentées par des nombres.

Température ambiante — Température relevée au voisinage d'un dispositif.

Temps mort — Intervalle de temps compris entre l'instant où l'on provoque une variation d'une grandeur d'entrée et l'instant où débute la variation corrélative de la grandeur de sortie.

Transducteur — Organe qui reçoit une information sous la forme d'une grandeur physique et la transforme en une grandeur physique de même nature ou de nature différente.

Transmetteur — Transducteur qui, grâce à un élément sensible, réagit à une grandeur mesurée et la transforme en un signal de transmission normalisé qui n'est fonction que de la grandeur mesurée.

Valeur idéale — Valeur exacte d'une grandeur mesurée par rapport à un étalon de mesure.

Valeur prescrite — Valeur désirée d'une grandeur.

Vanne de commande — Élément de réglage final qui module l'écoulement du fluide qui le traverse selon la commande d'un régulateur.

CONVERSIONS COURANTES

1 baril (35 gal imp.) (42 gal U.S.)	= 159,1 litres
1 gallon (imp.)	= 1,20094 gallon (U.S.)
1 cheval vapeur (chaudière)	= 9809,6 watts
1 cheval vapeur	= 2545 Btu/heure
1 cheval vapeur	= 0,746 kilowatts
1 joule	= 1 N-m
Kelvin	= (°C + 273,15)

1 kilowatt-heure	= 3600 kilojoules
1 Newton	= 1 Kg-m/s^2
1 thermie	= 10^5 Btu
1 tonne (réfrigérant)	= 12002,84 Btu/heure
1 tonne (réfrigérant)	= 3516,8 watts
1 watt	= 1 joule/seconde
degré Rankine	= (°F + 459,67)

Cubes

1 v^3 = 27 pi^3

1 pi^3 = 1728 po^3

1 cm^3 = 1000 mm^3

1 m^3 = 10^6 cm^3

1 m^3 = 1000 L

Carrés

1 v^2 = 9 pi^2

1 pi^2 = 144 po^2

1 cm^2 = 100 mm^2

1 m^2 = 10000 cm^2

PRÉFIXES SI

Préfixe	Symbole	Valeur numérique	Exposant
téra	T	1 000 000 000 000	10^{12}
giga	G	1 000 000 000	10^9
méga	M	1 000 000	10^6
kilo	k	1 000	10^3
hecto	h	100	10^2
déca	da	10	10^1
déci	d	0,1	10^{-1}
centi	c	0,01	10^{-2}
milli	m	0,001	10^{-3}
micro	u	0,000 001	10^{-6}
nano	n	0,000 000 001	10^{-9}
pico	p	0,000 000 000 001	10^{-12}

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS MÉTRIQUES EN UNITÉS IMPÉRIALES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/centimètre carré	A/cm^2	ampère/pouce carré	A/po^2	6,452
degré Celsius	°C	degré Fahrenheit	°F	(°C × 9/5) + 32
centimètre	cm	pouce	po	0,3937
centimètre cube	cm^3	pouce cube	po^3	0,06102
mètre cube	m^3	pied cube	pi^3	35,314
gramme	g	once	oz	0,03527
gramme	g	livre	lb	0,0022
gramme/litre	g/L	livre/pied cube	lb/pi^3	0,06243
joule	J	Btu	Btu	$9,480 \times 10^{-4}$
joule	J	pied-livre	pi-lb	0,7376
joule	J	cheval vapeur-heure	cv-h	$3,73 \times 10^{-7}$
joule/mètre, (Newton)	J/m, N	livre	lb	0,2248
kilogramme	kg	livre	lb	2,205
kilogramme	kg	tonne (longue)	tonne	$9,842 \times 10^{-4}$
kilogramme	kg	tonne (courte)	tn	$1,102 \times 10^{-3}$
kilomètre	km	mille	mille	0,6214
kilopascal	kPa	atmosphère	atm	$9,87 \times 10^{-3}$
kilopascal	kPa	pouce de mercure (32°F)	po de Hg	0,2953
kilopascal	kPa	pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	4,0147
kilopascal	kPa	livre/pouce carré	lb/po^2	0,1450
kilowatt	kW	pied-livre/seconde	pi-lb/s	737,6
kilowatt	kW	cheval vapeur	cv	1,341
kilowatt-heure	kWh	Btu	Btu	3413
litre	L	pied cube	pi^3	0,03531
litre	L	gallon (imp.)	gal (imp.)	0,21998
litre	L	gallon (U.S.)	gal (U.S.)	0,2642
litre/seconde	L/s	pied cube/minute	pi^3/min	2,1186
lumen/mètre carré	lm/m^2	lumen par pied carré	lm/pi^2	0,09290
lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	pied bougie	pi-b	0,09290
mètre	m	pied	pi	3,281
mètre	m	verge	yd	1,09361
partie par million	ppm	grain/gallon (imp.)	gr/gal (imp.)	0,07
partie par million	ppm	grain/gallon (U.S.)	gr/gal (U.S.)	0,05842
perméance (métrique)	PERM	perméance (imp.)	perm	0,01748
centimètre carré	cm^2	pouce carré	po^2	0,1550
mètre carré	m^2	pied carré	pi^2	10,764
mètre carré	m^2	verge carré	v^2	1,196
tonne (métrique)	t	livre	lb	2204,6
watt	W	Btu/heure	Btu/h	3,413
watt	W	lumen	lm	668,45

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/po^2	A/po^2	ampère/cm^2	A/cm^2	0,1550
atmosphère	atm	kilopascal	kPa	101,325
British Thermal Unit	Btu	joule	J	1054,8
Btu	Btu	kilogramme-mètre	kg-m	107,56
Btu	Btu	kilowatt-heure	kWh	$2,928 \times 10^{-4}$
Btu/heure	Btu/h	watt	W	0,2931
calorie, gramme	cal ou	g-cal joule	J	4,186
chaîne	chaîne	mètre	m	20,11684
pied cube	pi^3	mètre cube	m^3	0,02832
pied cube	pi^3	litre	L	28,32
pied cube/minute	pi^3/m	litre/seconde	L/s	0,47195
cycle/seconde	c/s	Hertz	Hz	1,00
degré Fahrenheit	°F	degré Celsius	°C	(°F−32)/1,8
pied	pi	mètre	m	0,3048
pied bougie	pi-b	lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	10,764
pied lambert	pi-L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,42626
pied-livre	pi-lb	joule	J	1,356
pied-livre	pi-lb	kilogramme-mètre	kg-m	0,1383
pied livre/seconde	pi-lb/s	kilowatt	kW	$1,356 \times 10^{-3}$
gallon (imp.)	gal (imp.)	litre	L	4,546
gallon (U.S.)	gal (U.S.)	litre	L	3,785
grain/gallon (imp.)	gr/gal(imp.)	partie par million	ppm	14,286
grain/gallon (U.S.)	gr/gal(U.S.)	partie par million	ppm	17,118
cheval vapeur	cv	watt	W	745,7
cheval vapeur-heure	cv-h	joule	J	$2,684 \times 10^6$
pouce	po	centimètre	cm	2,540
pouce de mercure (32°F)	po de Hg	kilopascal	kPa	3,386
pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	kilopascal	kPa	0,2491

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES (CONT.)

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
lambert	L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,183
lumen/pied carré	lm/pi^2	lumen/mètre carré	lm/m^2	10,76
lumen	lm	watt	W	0,001496
mille	mille	kilomètre	km	1,6093
once	oz	gramme	g	28,35
perm (0°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5{,}721 \times 10^{-11}$
perm (23°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5{,}745 \times 10^{-11}$
perm-pouce (0°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1{,}4532 \times 10^{-12}$
perm-pouce (23°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1{,}4593 \times 10^{-12}$
chopine (imp.)	chopine	litre	L	0,56826
livre	lb	gramme	g	453,5924
livre	lb	joule/mètre (Newton)	J/m N	4,448
livre	lb	kilogramme	kg	0,4536
livre	lb	tonne (métrique)	t	$4{,}536 \times 10^{-4}$
livre/pied cube	lb/pi^3	gramme/litre	g/L	16,02
livre/pouce carré	lb/po^2	kilopascal	kPa	6,89476
pinte	pinte	litre	L	1,1365
slug	slug	kilogramme	kg	14,5939
pied carré	pi^2	mètre carré	m^2	0,09290
pouce carré	po^2	centimètre carré	cm^2	6,452
verge carré	v^2	mètre carré	m^2	0,83613
tonne (longue)	ton	kilogramme	kg	1016
tonne (courte)	tn	kilogramme	kg	907,185
verge	v	mètre	m	0,9144

* "L" tel qu'utilisé dans l'éclairement.

Les valeurs typiques qui suivent peuvent servir de facteurs de conversion quand les données réelles manquent. Les équivalents en MJ et en BTU correspondent à la chaleur de combustion. Les chiffres applicables aux hydrocarbures correspondent à la valeur calorifique la plus élevée (poids humide). Certains produits sont de toute évidence des matières premières, mais ont été inclus au tableau pour le rendre plus complet et pour servir de référence. Les facteurs de conversion pour le charbon sont approximatifs puisque la valeur calorifique de ce produit varie selon la mine d'où il a été extrait.

TYPE D'ÉNERGIE	MÉTRIQUE	IMPÉRIAL
CHARBON		
— métallurgique	29 000 mégajoules/tonne	25,0 × 10^6 BTU/tonne
— anthracite	30 000 mégajoules/tonne	25,8 × 10^6 BTU/tonne
— bitumineux	32 100 mégajoules/tonne	27,6 × 10^6 BTU/tonne
— sous-bitumineux	22 100 mégajoules/tonne	19,0 × 10^6 BTU/tonne
— lignite	16 700 mégajoules/tonne	14,4 × 10^6 BTU/tonne
COKE		
— métallurgique	30 200 mégajoules/tonne	26,0 × 10^6 BTU/tonne
— pétrolier		
— brut	23 300 mégajoules/tonne	20,0 × 10^6 BTU/tonne
— calciné	32 600 mégajoules/tonne	28,0 × 10^6 BTU/tonne
POIX	37 200 mégajoules/tonne	32,0 × 10^6 BTU/tonne
PÉTROLE BRUT	38,5 mégajoules/litre	5,8 × 10^6 BTU/baril
MAZOUT N° 2	38,68 mégajoules/litre	5,88 × 10^6 BTU/baril 0,168 × 10^6 BTU/GI
PÉTROLE N° 4	40,1 mégajoules/litre	6,04 × 10^6 BTU/baril 0,173 × 10^6 BTU/GI
PÉTROLE N° 6 (MAZOUT LOURD C)		
— 2,5 % soufre	42,3 mégajoules/litre	6,38 × 10^6 BTU/baril 0,182 × 10^6 BTU/GI
— 1,0 % soufre	40,5 mégajoules/litre	6,11 × 10^6 BTU/baril 0,174 × 10^6 BTU/GI
— 0,5 % soufre	40,2 mégajoules/litre	6,05 × 10^6 BTU/baril 0,173 × 10^6 BTU/GI
KÉROSÈNE	37,68 mégajoules/litre	0,167 × 10^6 BTU/GI
DIESEL	38,68 mégajoules/litre	0,172 × 10^6 BTU/GI
GAZOLINE	36,2 mégajoules/litre	0,156 × 10^6 BTU/GI
GAZ NATUREL	37,2 mégajoules/m^3	1,00 × 10^6 BTU/M pi^3
PROPANE	50,3 mégajoules/kg 26,6 mégajoules/litre	0,02165 × 10^6 BTU/lb 0,1145 × 10^6 BTU/GI
ÉLECTRICITÉ	3,6 mégajoules/kWh	0,003413 × 10^6 BTU/kWh

Appareillage de mesure et de contrôle

Liste de contrôle 15-1

Page 1 de 2

Installation: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Système d'énergie	Mesuré oui/Non	Énergie consommée	Coût annuel	% Total	Précision de mesure	Fiabilité de mesure	Mesurage supplémentaire
Total chauffage							
Total refroidissement							
Total éclairage							
Centres de coût des processus							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
Entrepôt							
Chaufferie							
Traitement des déchets							
Atelier de maintenance							
Réfrigération							
Cuisine							
Installations récréatives							
Autres installations							
•							
•							
•							
•							

Appareillage de mesure et de contrôle
Liste de contrôle 15-1
Page 2 de 2

Installation: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Cette information permet-elle de déterminer de façon précise:

Les consommateurs d'énergie ?

L'énergie consomée ?

Un modèle d'emploi de l'énergie ?

Le rendement énergétique ?

Quelles améliorations pourrait-on apporter aux activités de mesure actuelles ?

De quel appareillage faut-il disposer pour réaliser ces améliorations ?

De nouveaux mesurages ?

Coût de l'appareillage: Coût total: .....$

Économies annuelles totales .....$

Économies possibles:

Période de rentabilité $= \frac{\text{Coût total}}{\text{Économies annuelles totales}}$

= _____$ par année

Un apparfeillage neuf ou amélioré semble-t-il justifié ? Dans l'affirmative, de quelle information supplémentaire a-t-on besoin:

Qui doit-on contacter ? À l'intérieur:

À l'extérieur:

Relevé des initiatives prises jusqu'ici: